

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS**

FERNANDO CEZAR MARIANO DINIZ

**PROJETO CONCEITUAL DE BANCADA DE LABORATÓRIO PARA
SIMULAÇÃO DE PROCESSO DE PERFURAÇÃO DE EXTRATO
ROCHOSO**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2021**

FERNANDO CEZAR MARIANO DINIZ

**PROJETO CONCEITUAL DE BANCADA DE LABORATÓRIO PARA
SIMULAÇÃO DE PROCESSO DE PERFURAÇÃO DE EXTRATO
ROCHOSO**

**Conceptual design of a laboratory bench for simulating of rock extract
drilling process**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph. D.

Coorientadores: Prof. Admilson Teixeira Franco, Dr.
Prof. Carlos Cziulik, Ph. D.

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite que outros façam download dos trabalhos e os compartilhem desde que atribuam crédito aos autores, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais. O link sobre a imagem dá acesso a todos os termos da licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



FERNANDO CEZAR MARIANO DINIZ

**PROJETO CONCEITUAL DE BANCADA DE LABORATÓRIO PARA SIMULAÇÃO DE PROCESSO DE
PERFURAÇÃO DE EXTRATO ROCHOSO.**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 16 de Julho de 2021

Prof Paulo Andre De Camargo Beltrao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Cezar Otaviano Ribeiro Negrao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcio Fontana Catapan, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Marco Antonio Luersen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/07/2021.

AGRADECIMENTOS

A Deus, grande mestre, pela saúde, fé, paciência e perseverança que tem me dado.

Aos meus pais, Edivaldo e Nadir, e minhas irmãs, Valeria e Josiane, pela inspiração, amor e condições para que eu pudesse estudar.

A minha namorada Marcela, por todo amor, afeto e incentivo. Além de todos os momentos que tornaram esta trajetória mais leve.

Ao meu orientador Professor Paulo André de Camargo Beltrão, pela orientação, disposição e dedicação à pesquisa. Muito obrigado pela paciência e confiança durante este período tão importante na minha vida.

Aos meus coorientadores Professores Admilson Teixeira Franco e Carlos Cziulik, pelos ensinamentos transmitidos e o suporte contínuo no desenvolvimento do trabalho.

A Nezia de Rosso, pesquisadora do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN), pelas dúvidas sanadas sobre o sistema de circulação de dispositivos de perfuração de poços de óleo e gás.

Aos membros da banca, pelas sugestões e contribuições.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da UTFPR - Campus Curitiba, pela contribuição de alto nível na minha formação acadêmica.

A todos aqueles que de alguma forma, direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"Porque o SENHOR é bom, e eterna a sua misericórdia; e a sua verdade dura de geração em geração."

Salmos 100:5

RESUMO

DINIZ, Fernando Cezar Mariano. **Projeto conceitual de bancada de laboratório para simulação de processo de perfuração de extrato rochoso**. 2021. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

O processo de perfuração de poços de petróleo e gás é custoso e complexo. Em situações *offshore*, as perfurações ocorrem em profundidades de vários quilômetros abaixo do nível do mar e o monitoramento da eficiência da operação torna-se um grande desafio de engenharia. Para maior domínio do processo é fundamental a realização de ensaios experimentais para avaliar a influência de parâmetros de perfuração na taxa de penetração da broca, com objetivo de reduzir os custos operacionais nesse processo. Entre os principais parâmetros, têm-se: a velocidade de rotação da coluna de perfuração, o peso sobre a broca, a vazão do fluido de perfuração, o tipo da rocha a ser perfurada, o modelo de broca utilizada e o torque. Os testes em plataformas reais têm custos elevados, além de disponibilidade restrita, devido à demanda constante da indústria de óleo e gás por mais produtividade. Assim, os dispositivos de perfuração em escala reduzida tornam-se a solução mais acessível para compreender o comportamento do processo de perfuração em campo. Existem diversas iniciativas para desenvolvimento e uso de protótipos em escala reduzida operando em laboratórios ao redor do mundo. Na UTFPR, há uma demanda por dispositivo similar, porém, a instituição ainda não conta com solução desta natureza. O objetivo geral deste trabalho é desenvolver o projeto mecânico conceitual de uma bancada de laboratório para investigar o processo de perfuração em extrato rochoso para extração de petróleo e gás. Após a avaliação de dados geométricos e operacionais de dispositivos de perfuração similares, utilizou-se a metodologia de projeto de Pahl & Beitz para desenvolvimento de uma proposta de bancada. Entre os resultados, foram propostas oito concepções de bancadas de laboratório. Uma das concepções foi escolhida como a de maior potencial construtivo, trata-se de uma bancada com 2,8 m de altura, empregando um servomotor conectado a um sistema de fuso de esferas para movimentação vertical da coluna de perfuração. Um motor de corrente contínua fornece energia para girar a coluna de perfuração da bancada. O sistema de circulação da bancada foi desenvolvido utilizando o conjunto tanque principal, tanque filtro, tanque reserva e bomba centrífuga, possibilitando testes de perfuração em variados tipos de rochas. O trabalho aborda, também, os principais sensores empregados na aquisição de dados de perfuração, além da tabela para conversão de escala dos principais parâmetros de perfuração, revelando os desafios de se manter as semelhanças geométricas, cinemáticas e dinâmicas entre dispositivos de tamanhos diferentes.

Palavras chave: Perfuração de poços de petróleo. Bancada de laboratório. Similaridade. Broca.

ABSTRACT

DINIZ, Fernando Cezar Mariano. **Conceptual design of a laboratory bench for simulating of rock extract drilling process.** 2021. 141 f. Dissertation (Master's Degree in Engineering) – Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, 2021.

The process of drilling oil and gas wells is costly and complex. In offshore situations, drilling occurs at depths of several kilometers below sea level and monitoring the efficiency of the operation becomes a major engineering challenge. For greater control of the process, it is essential to perform experimental tests to assess the influence of drilling parameters on the rate of penetration, in order to reduce operating costs in this process. Among the main ones, there are: the drill string rotational speed, the weight on bit, the flow of drilling fluids, the type of rock to be drilled, the bit type employed and the torque. Testing on real platforms is very expensive, in addition to limited feasibility, due to the constant demand of the oil and gas industry for more productivity. Therefore, small-scale drilling devices become the most accessible solution for understanding the behavior of the field drilling process. There are several initiatives for the development and operation of small-scale prototypes in laboratories around the world. At UTFPR, there is a demand for a similar device, however, the university does not have a solution of this nature yet. The general goal of this work is to develop the mechanical conceptual design of a laboratory bench to investigate the drilling process in rock extract for oil and gas extraction. After evaluating geometric and operational data from similar drilling devices, the Pahl & Beitz design methodology was applied for the development of a bench proposal. Among the results, eight laboratory bench designs were proposed. One of the concepts was chosen as the most constructive potential, it is a bench of 2.8 m tall, employing a servomotor connected to a ball screw system for vertical movement of the drill string. A DC motor provides power to rotate the drill string. The circulation system of the bench was developed employing the main tank, filter tank, reserve tank and centrifugal pump set, allowing drilling tests on various types of rocks. This work also addresses the main sensors utilized in the acquisition of drilling data, in addition to the spreadsheet for scaling the main drilling parameters, revealing the challenges of maintaining geometric, kinematic and dynamic similarities between devices of different sizes.

Keywords: Oil well drilling. Laboratory bench. Similarity. Bit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de projeto da bancada	24
Figura 2 - Plataforma rotativa convencional	27
Figura 3 - Estrutura de movimentação de cargas.....	28
Figura 4 – Sistemas de blocos em plataformas de perfuração	29
Figura 5 - Esquema da circulação do fluido de perfuração	31
Figura 6 - Esquema com o kelly e a mesa rotativa da plataforma.....	32
Figura 7 - Motor acoplado ao topo da coluna de perfuração.....	33
Figura 8 - Junta rotativa disposta na coluna de perfuração.....	34
Figura 9 - Exemplo de broca de diamante policristalino	36
Figura 10 - Taxa de penetração <i>versus</i> Peso sobre a broca.....	39
Figura 11 - Variação da taxa de penetração em relação à velocidade rotativa	41
Figura 12 - Indentação sobre material frágil.....	44
Figura 13 - Comparação entre modo de corte dúctil e frágil	45
Figura 14 - Transição dúctil-frágil em processo de riscamento em carboneto de tungstênio.....	46
Figura 15 - Movimentos de corte em brocas	47
Figura 16 – Situação de perfuração em brocas PDC	48
Figura 17 - Forças em três dimensões atuando no cortador PDC	49
Figura 18 - A área comprimida da rocha (A_v) num cortador PDC.....	52
Figura 19 - Dados calculados pelo modelo <i>versus</i> dados de campo	54
Figura 20 - Exemplo de bancada de laboratório.....	57
Figura 21 - Função global do processo de perfuração de rochas	64
Figura 22 - Estrutura funcional	65
Figura 23 - Concepção da bancada selecionada	81
Figura 24 - Componentes do sistema de içamento	84
Figura 25 – Esquema com o sistema de movimentação da coluna	86
Figura 26 - Vista superior de cortador PDC	86
Figura 27 - Fator de comprimento efetivo	89
Figura 28 - Sistema de circulação da bancada de laboratório	91
Figura 29 - Tanque principal.....	92
Figura 30 - Vista lateral e frontal dos tanques filtro	93

Figura 31 - Tanque filtro e tanque reserva	94
Figura 32 - Sensores da bancada de laboratório	99
Figura 33 - Leiaute principal da bancada	104
Figura 34 - Relação entre a vazão da bomba e o diâmetro do poço.....	106
Figura 35 - Tanque principal com a proteção de uma placa de acrílico	107
Figura A.1 - Forças atuando no cortador PDC.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Plataformas em escala reduzida	55
Quadro 2 - Faixas de operação de parâmetros em bancadas de perfuração	62
Quadro 3 – Matriz morfológica	66
Quadro 4 – Geração de concepções.....	70
Quadro 5 – Concepção 1	71
Quadro 6 – Concepção 2	72
Quadro 7 – Concepção 3	73
Quadro 8 – Concepção 4	74
Quadro 9 – Concepção 5	75
Quadro 10 – Concepção 6	76
Quadro 11 – Concepção 7	77
Quadro 12 – Concepção 8	78
Quadro 13 - Matriz de avaliação relativa	80
Quadro 14 - Propagadores de restrição	83
Quadro 15 - Principais parâmetros de conversão aplicados a modelos de plataformas.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de requisitos do projeto	63
Tabela 2 - Dados utilizados no dimensionamento da bomba	94
Tabela 3 - Avaliação das equações de conversão de escala.....	103

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

BHA	<i>Bottom hole assembly</i> - Componentes localizados na extremidade inferior da coluna
BMC	<i>Brittle mode cutting</i> - Modo de corte frágil
BOP	<i>Blowout preventer</i> - Preventor de erupção
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CERNN	Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos
DMC	<i>Ductile mode cutting</i> - Modo de corte dúctil
PDC	<i>Polycrystalline diamond compact bit</i> - Broca de diamante policristalino compacto
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> - Desdobramento da Função Qualidade
ROP	<i>Rate of penetration</i> - Taxa de penetração da broca
UCS	<i>Unconfined compression strength</i> – Resistência à compressão
UCT	<i>Undeformed chip thickness</i> - Espessura do cavaco não deformado
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WOB	<i>Weight on bit</i> - Peso sobre a broca

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas

a	Fator de correção empírico da litologia	[-]
A_c	Área de contato entre rocha/cortador	[m ²]
A_n	Área da secção anular	[m ²]
A_v	Área comprimida da rocha	[in ²]
A_w	Área plana relativa a região de desgaste	[m ²]
b	Fator de correção da rotação da broca	[-]
c	Fator de correção empírico do WOB	[-]
C	Coeficiente de atrito de ajuste	[-]
COR	Fator de correção para a taxa de penetração	[-]
d	Diâmetro da broca	[in]
d_c	Diâmetro do cortador	[in]
d_{ext}	Diâmetro externo da coluna de perfuração	[m]
d_{int}	Diâmetro interno da coluna de perfuração	[m]
d_s	Diâmetro médio do cascalho	[m]
e	Rugosidade interna da coluna de perfuração	[m]
E	Módulo de elasticidade	[Pa]
f	Fator de atrito entre o fluido e a parede interna da coluna	[-]
F	Força atuando no fuso de esferas	[N]
F_C	Força de corte perpendicular à superfície do cortador	[N]
F_{crit}	Força crítica de flambagem	[N]
F_{fc}	Força de atrito na interface cortador/rocha	[N]
F_{fw}	Força de atrito entre o plano de desgaste e a rocha	[N]
F_H	Força horizontal no cortador broca	[N]
F_N	Força normal no cortador broca	[N]
F_S	Força cisalhante no cortador da broca	[N]
F_w	Força de desgaste perpendicular ao cortador	[N]
I	Momento de inércia da área	[m ⁴]
K	Fator de comprimento efetivo	[-]
L	Comprimento da coluna de perfuração	[m]

n	Velocidade de rotação da broca	[rpm]
n_f	Velocidade de rotação no fuso	[rpm]
n_L	Fator de escala geométrico	[-]
NC	Número de cortadores na broca PDC	[-]
p	Passo do fuso de esferas	[m]
P	Profundidade de corte	[in]
P_{cc}	Potência mínima do motor de corrente contínua	[W]
P_s	Potência mínima do servomotor	[W]
Q	Vazão da bomba	[m ³ /s]
R_C	Resistência da rocha ao cisalhamento	[Pa]
R_p	Resistência à compressão da rocha	[Pa]
R_t	Razão de transporte de fluido	[-]
T	Torque mínimo no fuso	[Nm]
T_c	Torque na coluna de perfuração	[Nm]
v_f	Velocidade do fluido no espaço anular	[m/s]
v_{sl}	Velocidade de sedimentação do cascalho	[m/s]
V	Velocidade média do escoamento do fluido	[m/s]

Letras gregas

α	Ângulo de ataque do cortador	[°]
β	Ângulo de saída lateral do cortador	[°]
ϵ	Eficiência do servomotor/motor de corrente contínua	[-]
ϵ_f	Fator de eficiência do fuso	[-]
μ	Coeficiente de atrito entre a rocha e o cortador	[-]
$\mu_{\text{água}}$	Viscosidade dinâmica da água	[Pa.s]
ρ	Densidade do fluido de perfuração	[kg/m ³]
ρ_s	Densidade do concreto	[kg/m ³]
σ_p	Resistência à compressão da rocha	[psi]
ω	Velocidade angular da coluna de perfuração	[rad/s]

Parâmetros adimensionais

Ca	Número de Cauchy	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.1.1 Objetivos Específicos.....	21
1.2 JUSTIFICATIVA.....	22
1.3 ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2 PARÂMETROS DE PERFURAÇÃO EM BANCADAS EXPERIMENTAIS.....	27
2.1 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS	28
2.1.1 Torre e Guinchos.....	28
2.1.2 Bloco de Coroamento e Bloco Viajante (Catarina)	29
2.2 SISTEMA DE CIRCULAÇÃO	29
2.3 SISTEMA DE ROTAÇÃO	31
2.3.1 Mesa Rotativa e <i>Kelly</i>	31
2.3.2 <i>Top Drive</i> e Motor de Fundo.....	32
2.3.3 Junta Rotativa	33
2.3.4 Coluna de Perfuração e o Comando	34
2.3.5 Broca	35
2.4 DESEMPENHO DO SISTEMA DE PERFURAÇÃO	36
2.4.1 Taxa de Penetração da Broca.....	37
2.4.2 Torque	38
2.4.3 Peso sobre a Broca	39
2.4.4 Velocidade de Rotação	40
2.4.5 Vazão do Fluido	41
2.4.6 Litologia.....	42
2.5 FURAÇÃO DE MATERIAIS FRÁGEIS.....	43
2.5.1 Mecanismo de Corte Dúctil	44

2.6 FUNDAMENTOS DE PERFURAÇÃO DE ROCHAS.....	46
2.6.1 Forças nas Brocas de Diamante Policristalino Compacto.....	49
2.6.2 Modelo para Previsão da Taxa de Penetração da Broca.....	51
2.7 REDUÇÃO DE ESCALA.....	54
2.8 OPORTUNIDADES EM PROJETOS RECENTES DE BANCADAS.....	57
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO CONCEITUAL.....	61
3.1 ESCLARECIMENTO DA TAREFA.....	61
3.2 PROJETO CONCEITUAL.....	64
3.2.1 Função Global.....	64
3.2.2 Estrutura Funcional.....	64
3.2.3 Matriz Morfológica.....	65
3.2.4 Geração das Concepções.....	70
3.2.5 Seleção da Solução.....	78
3.3 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO SELECIONADA.....	80
4 PRÉ-PROJETO PRELIMINAR.....	83
4.1 PROPAGADORES DE RESTRIÇÃO.....	83
4.2 SISTEMA DE IÇAMENTO.....	84
4.2.1 Dimensionamento do Servomotor.....	84
4.3 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DA COLUNA.....	86
4.3.1 Cálculo Preliminar da Taxa de Penetração da Broca.....	87
4.3.2 Análise de Flambagem da Coluna de Perfuração.....	88
4.3.3 Dimensionamento do Motor de Corrente Contínua.....	89
4.4 SISTEMA DE CIRCULAÇÃO.....	90
4.4.1 Dimensionamento da Bomba.....	94
4.5 SENSORES PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.....	97
4.6 EQUAÇÕES PARA CONVERSÃO DE ESCALA.....	99
4.6.1 Avaliação das Equações de Conversão de Escala.....	103

4.7 LEIAUTE PRELIMINAR DA BANCADA.....	104
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
5.1 CONCLUSÕES	109
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
REFERÊNCIAS.....	113
APÊNDICE A – MODELOS DE RAJABOV.....	125
APÊNDICE B – ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA	130
APÊNDICE C – DESENHOS DA BANCADA.....	132

1 INTRODUÇÃO

A palavra petróleo tem origem no latim, sendo a união das palavras *petra* (pedra) e *oleum* (óleo). Este combustível fóssil é disposto na forma líquida, oleosa e inflamável, com cor característica entre o castanho-claro e o negro, e é encontrado tanto no subsolo quanto abaixo do assoalho oceânico. O petróleo é o combinado de centenas de compostos químicos orgânicos, conhecidos como hidrocarbonetos. O óleo é concebido na rocha geradora e migra para a rocha reservatório. Num segundo movimento chega até a rocha selante, que tem baixa permeabilidade e funciona como depósito para o aprisionamento do combustível fóssil (LYONS; PLISGA; LORENZ, 2015).

A indústria do petróleo é enorme. Mesmo no século XXI ainda existem grandes desafios para serem compreendidos e superados, como é o caso da produção de petróleo em águas profundas ou *offshore*. O alto potencial das reservas localizadas na Bacia de Campos, na costa do estado do Rio de Janeiro, estimulou o aumento dos investimentos da PETROBRAS na exploração de petróleo no fundo do Oceano Atlântico. Como resultado, no ano de 2010, 22% do total do petróleo extraído em águas profundas e ultraprofundas no mundo era produzido pela PETROBRAS, conduzindo a estatal ao papel de destaque nas operações *offshore* em todo o mundo (MORAIS, 2013).

A operação de perfuração de poço é complexa e onerosa. Além disso, vários problemas são comuns na perfuração, como: baixo desempenho da taxa de penetração, excesso de vibração na coluna de perfuração, atrito excessivo entre a coluna e a parede do poço, problemas de instabilidade do terreno, dificuldades na limpeza dos cascalhos decorrentes do corte, problemas de circulação do fluido de perfuração e incapacidade ou falha da broca de perfuração na interação com a rocha (HARELAND; RAMPERSAD, 1994). O maior conhecimento sobre o processo de perfuração tem se tornado cada vez mais necessário para que seja atingida a máxima eficiência na operação de perfuração de poços de óleo e gás.

As brocas de diamante policristalino compacto (PDC) se popularizaram na indústria de óleo e gás, principalmente na perfuração de rochas macias e moderadas (HARELAND et al., 2009). As brocas PDC podem ter as suas características de corte adaptáveis de acordo com a superfície que se pretenda perfurar. São comuns

os ajustes realizados pelos projetistas de brocas no número de cortadores, posição e espaçamento, dimensões, ângulos geométricos associados à ferramenta de corte, entre outros aspectos (PLÁCIDO; PINHO, 2009; GAO, 2017).

As brocas são ferramentas de elevado custo, e a sua substituição quando danificada é demorada e pode aumentar, de forma significativa, os custos das operações de perfuração. Assim, a compreensão das variáveis que influenciam a taxa de penetração da broca na superfície perfurada é essencial para mitigar as ocorrências de falhas e reduzir a quantidade de paradas operacionais para verificações, reparos e substituições.

Para tanto, uma das estratégias empregadas é a de se projetar bancadas de laboratório visando aprofundar o entendimento dos fenômenos envolvidos em perfuração de poços. Neste contexto, pode-se citar o trabalho de Forster (2011) que utilizou um modelo simplificado de plataforma, em escala reduzida, com objetivo de medir e mitigar as vibrações observadas na extremidade da broca. Esmaeli et al. (2012) utilizaram configuração de coluna de perfuração para analisar e descobrir a máxima taxa de penetração de uma broca, perfurando com variados valores de peso sobre a broca e diferentes velocidades de rotação da coluna de perfuração. Patil e Teodoriu (2013) conceberam uma configuração para medição da influência das vibrações torcionais na coluna de dispositivo de perfuração. Loeken et al. (2018) estudaram a automatização de bancada de laboratório para o maior controle nos ajustes dos principais parâmetros de perfuração. Wiktorski et al. (2019) utilizaram câmera de alta resolução para o monitoramento dos movimentos dinâmicos da coluna de perfuração de dispositivo experimental, possibilitando a avaliação dos três principais modos de vibrações que incidem sobre a estrutura: axial, torcional e lateral.

Tendo estas informações em mente, pretende-se desenvolver a partir de demandas de pesquisadores do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) da UTFPR, um projeto de plataforma de perfuração de extrato rochoso, em escala reduzida, no qual seja possível monitorar a influência da velocidade de rotação da coluna de perfuração, do peso aplicado sobre a broca para perfurar, da vazão do fluido de perfuração, do tipo de rocha, do modelo de broca e do torque no desempenho de perfuração, de forma mais acessível.

Um dos maiores desafios na fabricação de bancadas de laboratório está em replicar semelhanças geométricas, cinemáticas e dinâmicas completas dos componentes de perfuração de plataformas reais. De acordo com Srivastava e Teodoriu (2019) somente alguns autores mencionaram considerar a análise dimensional para a correta redução de escala de plataformas de perfuração. A pesquisa de Westermann et al. (2015) abordou a redução de escala de uma seção de coluna de perfuração para análise de vibrações utilizando um dispositivo horizontal. A lacuna que existe nos experimentos em bancadas que não são submetidas à redução de escala tende a dificultar a comparação dos resultados de testes, e a influência dos principais parâmetros de perfuração na taxa de penetração da broca, com as plataformas reais.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é desenvolver o projeto mecânico conceitual de bancada experimental de laboratório, em escala reduzida, para investigar o processo de perfuração em extrato rochoso para extração de petróleo.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são desenvolvidos:

1. Definir os principais parâmetros que influenciam na eficiência de perfuração em plataformas reais;
2. Identificar as lacunas operacionais e geométricas em protótipos recentes de perfuração;
3. Determinar os esforços preliminares dos principais sistemas da bancada de laboratório a ser projetada;
4. Definir as equações para conversão de escala dos principais parâmetros de perfuração.

1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando o cenário dos novos campos de petróleo na costa brasileira, a perfuração de poços de petróleo em águas profundas se torna essencial para o futuro das operações de exploração de petróleo no cenário nacional. Em 2020, o custo de perfuração do poço 7 GLF 49H ESS no campo de Golfinho, na Bacia do Espírito Santo, foi de cerca de US\$ 30 milhões (PETROBRAS, 2020). Portanto, uma maior compreensão das variáveis que influenciam na eficiência de perfuração de poços é fundamental para mitigar a ocorrência de falhas e reduzir as despesas operacionais.

A realização de testes em plataformas reais é muito onerosa. Desta forma, as simulações de processo de perfuração de extrato rochoso numa bancada de laboratório poderia proporcionar a obtenção de parâmetros de perfuração (taxa de penetração, torque, peso sobre a broca, velocidade de rotação da coluna, vazão do fluido de perfuração, entre outros.) de modo mais rápido e barato. Sendo assim, o projeto mecânico conceitual da bancada de laboratório a ser desenvolvido norteará a futura fabricação do protótipo que poderá ser empregado tanto para determinar a otimização dos parâmetros de operação e desempenho a partir de análise de experimentos, quanto para fornecer informações importantes para o desenvolvimento de modelos matemáticos, visando a obtenção das correlações que melhor representem os problemas relacionados ao processo de perfuração de extratos rochosos em operações *offshore*.

1.3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A metodologia é a explicação detalhada do caminho que o projeto de pesquisa vai trilhar na busca de respostas para problemas técnicos, no caso de engenharia. Neste escopo, devem ser estabelecidas as estratégias para a execução do trabalho, os dispositivos empregados no estudo, o planejamento das atividades, além dos procedimentos científicos e técnicos para análise dos dados (GIL, 2008).

A demanda pelo desenvolvimento de uma bancada de laboratório para perfuração de extrato rochoso decorre da necessidade dos pesquisadores do CERNN, por um dispositivo de perfuração que simule a influência de combinações

dos principais parâmetros de perfuração na eficiência de perfuração de poços. Uma das questões que a bancada de laboratório poderia ajudar a responder é sobre o comportamento de uma broca, perfurando no mesmo poço variadas camadas de rochas com características superficiais distintas. Além disso, qual a geometria de broca seria mais indicada para situações de perfuração tão heterogêneas, e o quanto esse problema impacta na taxa de desgaste e na redução da vida útil da ferramenta.

Para isto, na primeira fase do desenvolvimento deste trabalho são realizados estudos e análises de projetos, que simularam operações de plataformas reais em bancadas na última década. Para a execução do projeto mecânico da bancada de laboratório é utilizada uma adaptação do Projeto Conceitual da metodologia de Pahl & Beitz (PAHL, G. et al., 2007), que é uma metodologia caracterizada pela simplicidade e alta efetividade em desenvolvimento de projetos. Ao fim do Projeto Conceitual são fornecidos desenhos em duas e três dimensões em tamanhos proporcionais no *software* de modelagem *Solidworks*, baseados nas premissas de projeto. Ademais, é feita a análise para determinar se a melhor solução encontrada atende aos requisitos do projeto, decididos no Esclarecimento da Tarefa, comparando a concepção escolhida com as bancadas em operação e revisadas no trabalho. Além disso, são desenvolvidas e apresentadas as equações de conversão de parâmetros de perfuração da bancada para as plataformas reais com o auxílio *software* de análise de dados *Microsoft Excel*. As fases do projeto da bancada são mostradas no fluxograma da Figura 1, com pontos de decisão a partir da fase de Esclarecimento de Tarefa:

Esclarecimento da Tarefa: é onde o problema é definido. A revisão dos trabalhos recentes evidencia as lacunas que existem nos dispositivos de perfuração de poços em escala reduzida. Os parâmetros abordados no capítulo 2 auxiliam na definição dos atributos que a bancada de perfuração de extrato rochoso deve ter e quais requisitos são fundamentais para a sua concepção;

Projeto Conceitual: nesta fase, busca-se identificar os principais problemas inseridos no desenvolvimento da bancada e para isso a abstração é o meio para alcançar possíveis soluções iniciais. Torna-se necessário nesta fase o

desenvolvimento de fluxogramas, croquis e estruturas com as funções e subfunções constituintes do produto. A decisão final sobre a melhor concepção é definida por análise técnica. Ou seja, a estrutura escolhida deve atender aos requisitos de projetos delimitados na fase anterior. Por fim, são definidos os propagadores de restrição no projeto, além dos esforços preliminares de cada um dos sistemas que compõem a bancada com maior potencial construtivo;

Tabela com equações de redução de escala: nesta fase, são desenvolvidas as equações para a redução de escala de parâmetros de perfuração de plataformas reais, respeitando as similaridades geométricas, cinemáticas e dinâmicas entre as estruturas.

Figura 1 - Etapas de projeto da bancada

(continua)

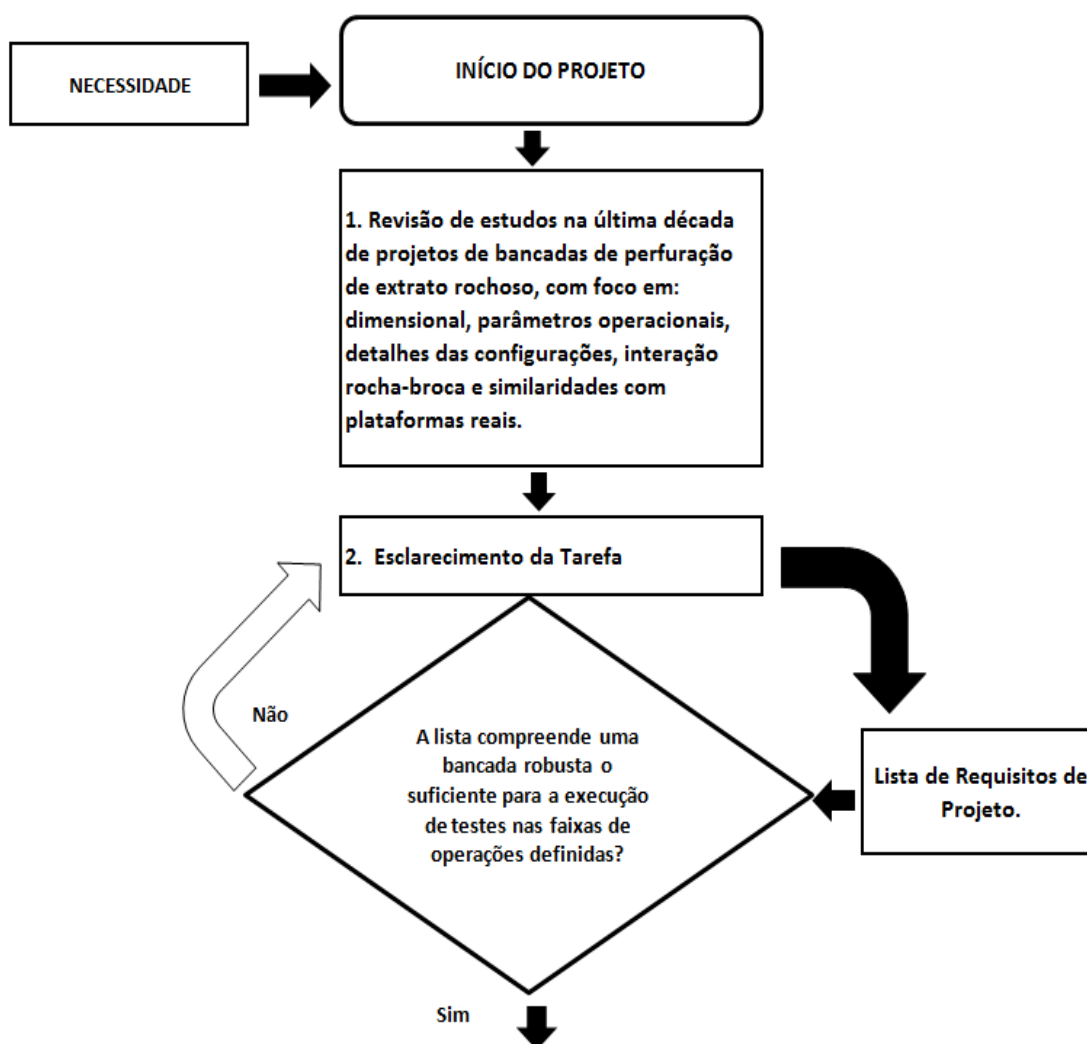
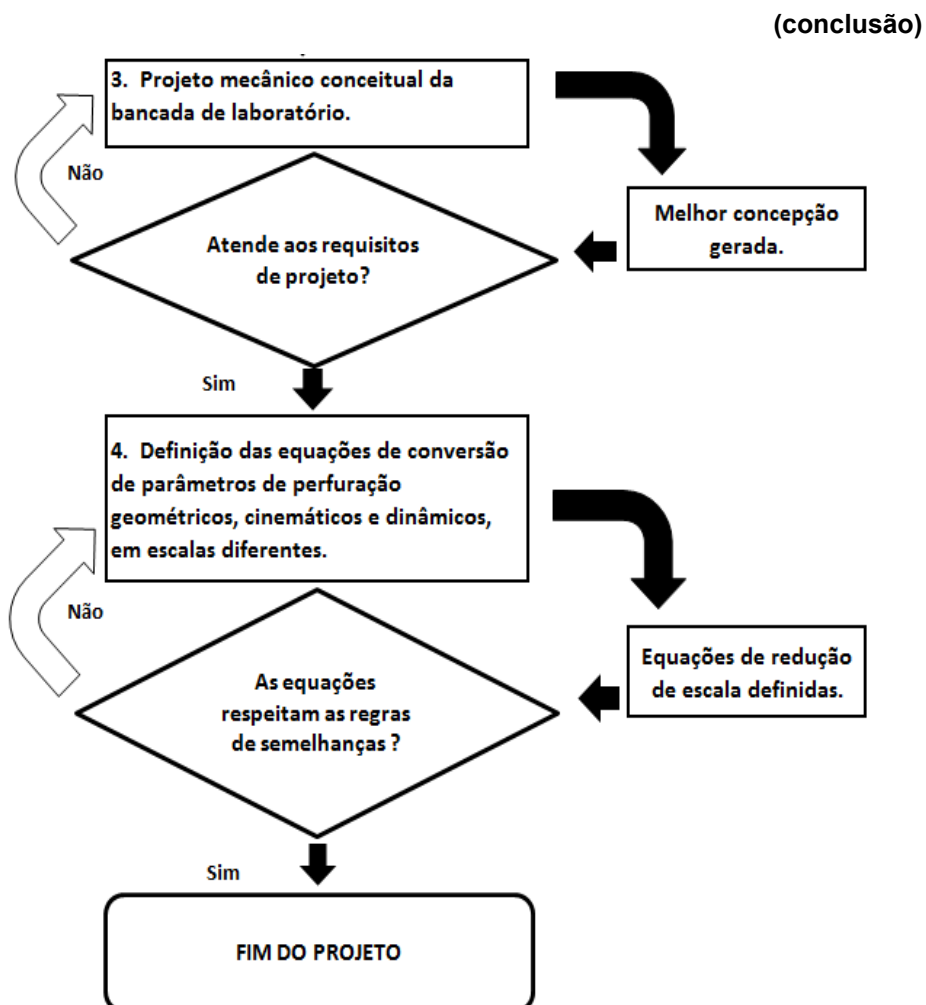


Figura 1 – Etapas de projeto da bancada



Fonte: Adaptado de Maribondo (2000) e Pahl et al. (2007)

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo contextualiza os principais problemas em perfurações de poços de petróleo e gás, e os desafios de engenharia inerentes a esta operação. Além disso, no primeiro capítulo discute-se sobre algumas pesquisas que utilizam bancadas de testes, bem como as dificuldades de similaridade em relação às plataformas em tamanho real. Ainda, no primeiro capítulo é exposto o objetivo geral, os objetivos específicos para alcançá-lo e a justificativa do trabalho. Ademais, é abordada a adaptação da metodologia de projeto mecânico de Pahl & Beitz, escolhida para a execução do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os conceitos de perfuração *offshore*, além dos sistemas essenciais que suportam a operação. São discutidos os principais parâmetros de desempenho de perfuração, os fundamentos de perfuração, as forças atuantes e a taxa de penetração em brocas PDC, além dos fundamentos que tratam da análise dimensional e similaridades.

No capítulo 3 são definidos os requisitos de projeto e são desenvolvidas as etapas de projeto conceitual da bancada de laboratório.

O capítulo 4 aborda o pré-projeto preliminar do dispositivo. Nessa etapa, são detalhados e dimensionados os principais sistemas da bancada de maior potencial.

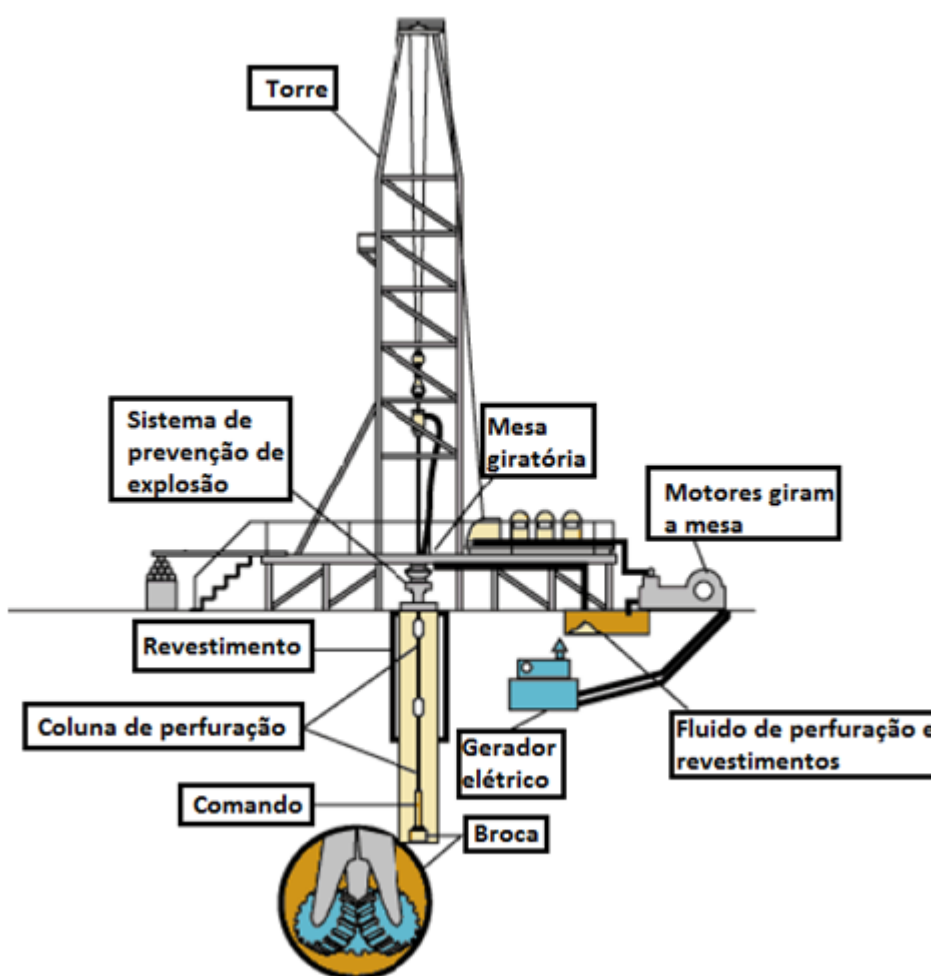
O capítulo 5 finaliza o trabalho ressaltando os principais aspectos abordados no desenvolvimento do projeto conceitual da bancada experimental de laboratório. Além disso, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 PARÂMETROS DE PERFURAÇÃO EM BANCADAS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os conceitos de perfuração *offshore* com foco nos principais sistemas que suportam a operação. Além disso, aborda os parâmetros mais relevantes no desempenho de perfuração, os fundamentos da furação de extratos rochosos, as forças atuantes e a taxa de penetração em brocas PDC. Finalmente são apresentados os fundamentos da análise dimensional e a revisão dos estudos das bancadas de laboratório mais recentes.

Na Figura 2 são mostrados os componentes de uma plataforma rotativa convencional de perfuração, composta de três sistemas principais: sistema de movimentação de cargas, sistema de circulação e sistema rotativo, que são identificados e detalhados nas próximas seções.

Figura 2 - Plataforma rotativa convencional



Fonte: Adaptado de Freudenrich e Strickland (2001)

2.1 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS

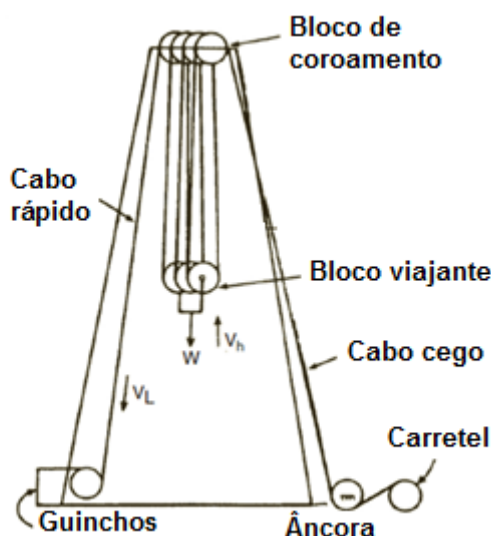
O sistema de movimentação de cargas é responsável pelo içamento, ou elevação e abaixamento, da coluna de perfuração. O sistema é formado por guinchos, bloco viajante, bloco de coroamento, ganchos, cabos, entre outros.

2.1.1 Torre e Guinchos

A torre é a parte da estrutura de aço da plataforma, onde é realizada a elevação das seções da coluna. Para isso, deve ter altura e força suficiente para desempenhar as suas funções.

O esquema da Figura 3 demonstra a estrutura de movimentação de cargas da plataforma e seus componentes. A principal função dos guinchos é o de levantamento e abaixamento da coluna de perfuração e, também, da sustentação das novas tubulações decorrentes do processo periódico de adição de novas juntas de tubos à medida que se estende o comprimento da perfuração. As elevações ocorrem graças aos cabos que ficam enrolados no tambor, dentro dos puxadores. A máquina de guincho também contém embreagens e engrenagens necessárias para controlar a velocidade e frear o sistema de cargas. É necessário acompanhar o desgaste que ocorre nos cabos, devido à alta solicitação (LAIK, 2018).

Figura 3 - Estrutura de movimentação de cargas

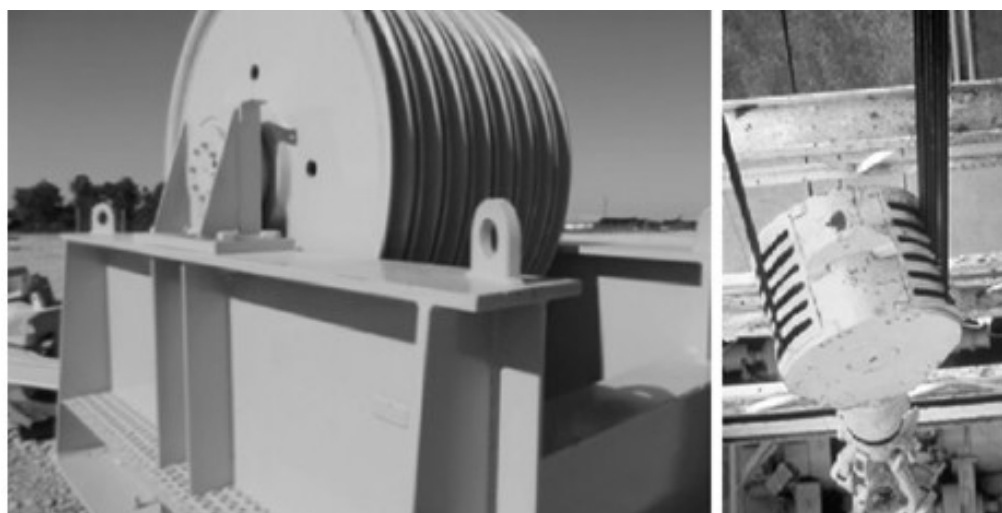


Fonte: Adaptado de Lyons, Plisga e Lorenz (2015)

2.1.2 Bloco de Coroamento e Bloco Viajante (Catarina)

O bloco de coroamento está assentado na parte superior da plataforma de perfuração. Já o bloco viajante se move para cima e para baixo durante as operações, para elevar ou abaixar a coluna de perfuração (Figura 4). Ambos fazem parte do sistema de força composto de polias que permitem ao guincho suportar altas solicitações decorrentes do peso da coluna de perfuração. As polias móveis possibilitam maior distribuição de pesos na estrutura de perfuração. Uma das extremidades do cabo de perfuração é fixada a um ponto de ancoragem abaixo do piso da plataforma, conhecido como cabo cego, pois é estático. A outra extremidade do cabo é vinculada ao carretel da plataforma e é denominado cabo rápido (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015).

Figura 4 – Sistemas de blocos em plataformas de perfuração



(a) Bloco de coroamento

(b) Bloco viajante

Fonte: Adaptado de Gao (2017)

2.2 SISTEMA DE CIRCULAÇÃO

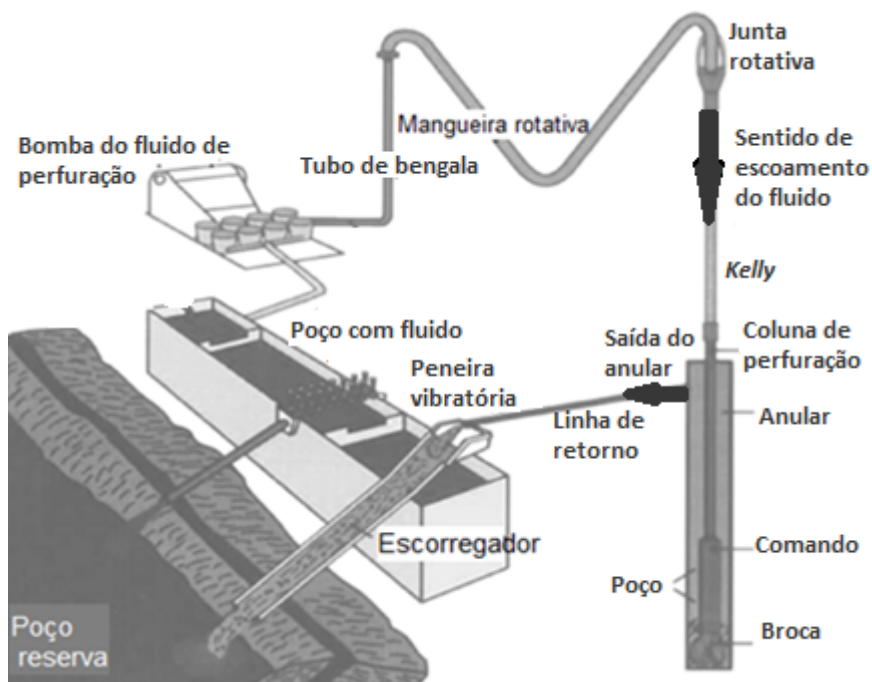
Este sistema é composto de mecanismos que possibilitam o escoamento e o tratamento do fluido no processo de perfuração. O fluido de perfuração utilizado é uma mistura complexa de líquidos, sólidos e produtos químicos. O ciclo do sistema de circulação da plataforma se inicia no bombeamento do fluido através da coluna de perfuração até a extremidade da broca. Na segunda etapa, o fluido regressa por

meio do espaço anular, entre a coluna e a parede do poço, até a superfície da plataforma, transportando os cascalhos procedentes das rochas perfuradas. Então, o fluido é tratado e o ciclo é reiniciado (HYNE, 2012). Diversas variáveis influenciam na eficiência da limpeza de fundo de poço, tais como: velocidade do fluido de perfuração no espaço anular, propriedades reológicas do fluido, densidade do fluido, granulometria dos cascalhos, velocidade de sedimentação do cascalho, inclinação do poço, taxa de penetração da broca, velocidade de rotação da coluna de perfuração, diâmetro da coluna, entre outros. Uma melhor combinação dessas variáveis aumenta a capacidade do fluido de suspender os cascalhos e melhorar a eficiência da limpeza de fundo de poço e do espaço anular (SIFFERMAN; BECKER, 1992; BILGESU et al., 2007).

Além da sua função primordial de movimentação dos cascalhos da perfuração, o fluido tem outras atribuições importantes, como: resfriamento e lubrificação da broca, redução do atrito que existe entre as paredes do poço e os componentes da coluna, fixação das paredes do poço além do controle da pressão de fundo de poço (LAIK, 2018).

O fluido de perfuração sai da bomba e passa através de um tubo rígido vertical (tubo de bengala), mangueira rotativa, junta rotativa, *kelly* (elemento que recebe o torque da plataforma), coluna de perfuração, comando até chegar à broca. O fluido já com o cascalho retorna pelo espaço anular. Antes de atingir a superfície, passa pelo preventor de erupção (BOP) e pela linha de retorno. Após todo esse caminho, inicia o seu processo de tratamento para retornar à broca (HYNE, 2012). Existe uma série de dispositivos de condicionamento que servem para esse propósito. Entre eles, a peneira vibratória, que é utilizada para separar o fluido dos cascalhos e detritos maiores, o desareador que retira a areia da mistura e o dessiltador que é responsável pela remoção do silte, que são partículas muito finas com diâmetros que variam de 4 a 62 micrômetros (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015; GAO, 2017). Após esse processo, o fluido já está pronto para nova circulação. O ciclo completo pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Esquema da circulação do fluido de perfuração



Fonte: Adaptado de Gao (2017)

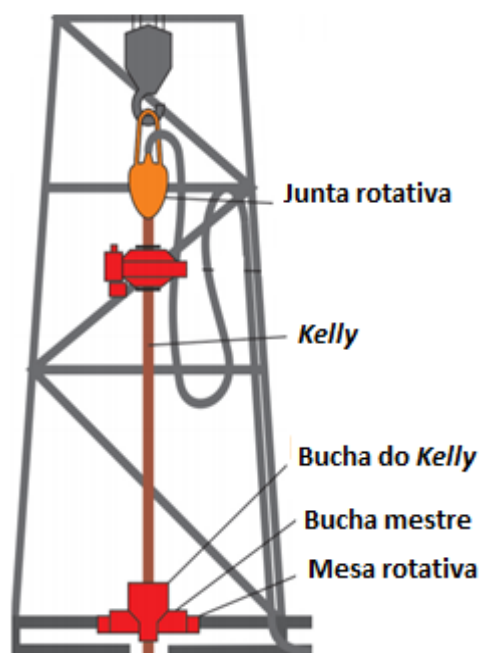
2.3 SISTEMA DE ROTAÇÃO

A função do sistema rotativo é gerar rotação para girar a coluna de perfuração a partir da superfície da plataforma. A energia mecânica é fornecida a uma série de engrenagens na mesa rotativa. Em seguida, a rotação é transmitida para a seção giratória do piso da plataforma que fornece energia para mover a coluna e os componentes da sua extremidade inferior. O sistema de equipamentos de rotação da coluna de perfuração inclui a junta rotativa, o *kelly*, a mesa rotativa, a coluna de perfuração, os comandos e a broca.

2.3.1 Mesa Rotativa e *Kelly*

A mesa rotativa é o dispositivo que tem duas funções principais: transmitir rotação à coluna e possibilitar a livre movimentação do *kelly* no seu interior (HYNE, 2012). A Figura 6 mostra o esquema com a mesa rotativa e o *kelly*.

Figura 6 - Esquema com o kelly e a mesa rotativa da plataforma



Fonte: Adaptado de Paulauskiene (2018)

O *kelly* é o dispositivo com formato de haste e seção hexagonal ou quadrada que tem como função principal a transmissão do torque da mesa rotativa à coluna de perfuração. Para conectar a mesa rotativa ao *kelly* é utilizada a bucha do *kelly*, que por sua vez se encaixa na bucha mestre, que é o dispositivo alojado na mesa rotativa e utilizado para sustentar o peso da estrutura de perfuração e transmitir movimento à bucha do *kelly*. Nem todas as plataformas de perfuração usam o sistema *kelly* (LAIK, 2018).

2.3.2 *Top Drive* e Motor de Fundo

Nos últimos anos, os motores acoplados ao topo da coluna de perfuração ganharam popularidade, entre outras razões, por eliminar o uso do conjunto *Kelly*-Mesa rotativa. O *Top Drive* se conecta ao topo da coluna, fornecendo torque rotacional, fluidos, e apoio à estrutura de perfuração (Figura 7). A possibilidade de perfurar de três em três tubos transformou o *Top Drive* na opção mais eficiente, além de apresentar menor complexidade operacional, maior segurança e melhor controle no peso sobre a broca e no torque máximo, isso se comparado à perfuração rotativa tradicional (GAO, 2017).

Figura 7 - Motor acoplado ao topo da coluna de perfuração



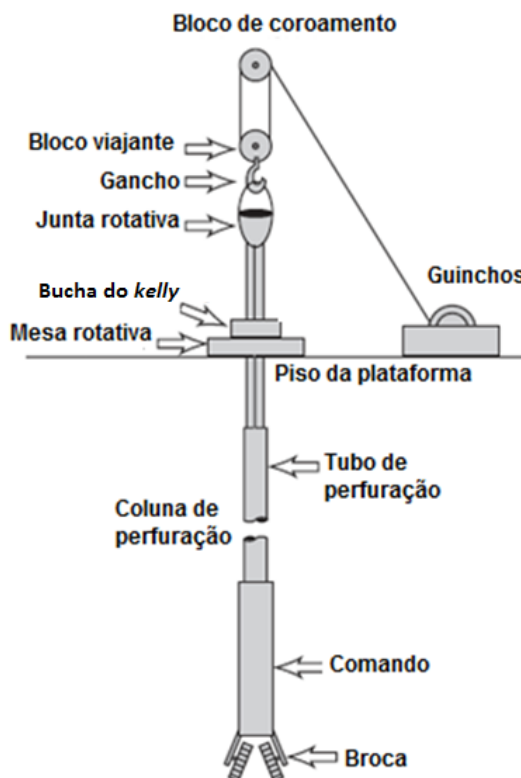
Fonte: Warren et al. (2004)

O motor de fundo é um dispositivo hidráulico do tipo turbina que é posicionado acima da broca. O torque do motor de fundo tem origem no escoamento do fluido de perfuração que se move no seu interior. Devido a essa configuração, somente a parte inferior do dispositivo se movimenta, reduzindo, conseqüentemente, o desgaste na coluna de perfuração (LYONS; PLISGA; LORENZ, 2015).

2.3.3 Junta Rotativa

A junta rotativa é o dispositivo do sistema de perfuração que possibilita a separação entre os elementos estacionários dos rotativos. Além de suportar o peso da coluna, ela também tem a função de ser o mecanismo no qual o fluido de perfuração é introduzido para o interior da coluna (GAO, 2017). A junta fica localizada na parte superior do *kelly*, e é suportada pelo gancho do bloco viajante (Figura 8).

Figura 8 - Junta rotativa disposta na coluna de perfuração



Fonte: Adaptado de Hyne (2012)

2.3.4 Coluna de Perfuração e o Comando

A coluna de perfuração está localizada abaixo do *kelly*, sendo construída comumente de aço e composta por seções de tubos com comprimento de aproximadamente 9,1 m (30 pés) e diâmetro externo que varia de 7,3 a 14 cm (27/8 - 5½ polegadas). Devido às dimensões limitadas, quando a perfuração se estende para camadas mais profundas, é necessário adicionar mais tubos para atingir a profundidade pretendida. Para tal, esses tubos dispõem de conexão macho em uma das extremidades e fêmea na outra. As extremidades rosqueadas são cônicas para facilitar a conexão e manter os tubos de perfuração parafusados. A coluna de perfuração tem como função primordial a transferência de rotação à broca, além de servir de acesso para o fluido de perfuração (GAO, 2017).

Os comandos são elementos tubulares com paredes espessas confeccionadas em aço. Entre suas funções principais, podem-se citar três: i/ conectar a broca à coluna de perfuração; ii/ fornecer estabilidade e rigidez à coluna; e iii/ aplicar peso extra na broca, propiciando perfurações mais efetivas nos

elementos de rochas. Os comandos mais modernos possuem comprimento unitário de aproximadamente nove metros (LYONS, 1996).

Uma estrutura rotativa perfurando poços que chegam a 5000 metros de profundidade tem cerca de 100 toneladas. Uma fração desse valor gera o peso sobre a broca (WOB), que é a força axial que atua no sistema de perfuração (GANDELMAN, 2012). Esse importante parâmetro é abordado com mais detalhes na subseção 2.4.3.

2.3.5 Broca

A broca está posicionada na extremidade inferior da coluna de perfuração, e tem como função principal perfurar cortando ou triturando as rochas em pequenos fragmentos, conhecidos como cascalhos. Além disso, atua no sistema de circulação da plataforma, pois é o último mecanismo por onde o fluido de perfuração se dirige antes de alcançar a superfície perfurada (GAO, 2017).

Segundo Wang e Luo (1988), na interface de perfuração, onde ocorre o corte e a subsequente penetração nas rochas, existem vários tipos de processos diferentes, tais como: indentação, cisalhamento e compressão. Daí a importância de se conhecer as características mecânicas da superfície que se deseja perfurar.

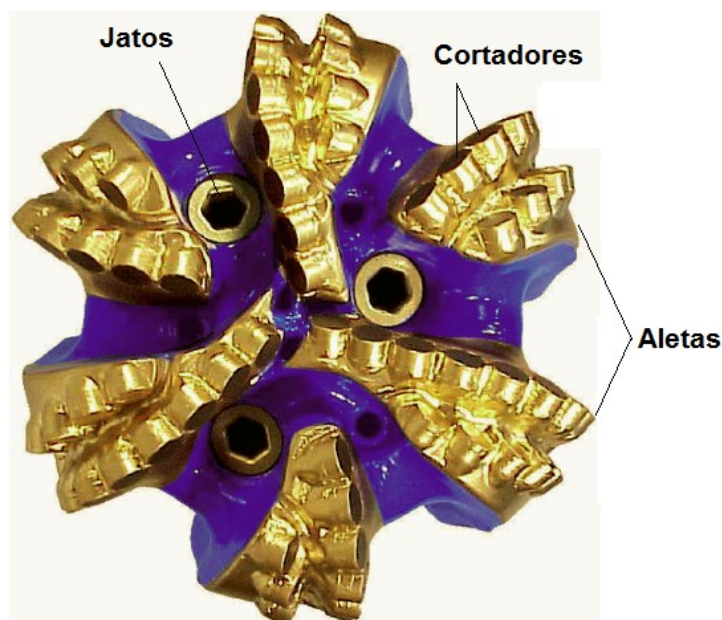
As brocas de diamante policristalino compacto (PDC) se popularizaram na indústria do petróleo, principalmente, na perfuração de rochas macias e moderadas. Todavia, ainda apresentam limitações de baixa taxa de penetração e de desgaste acentuado em superfície duras (HARELAND et al., 2009; PLÁCIDO; PINHO, 2009).

Os detalhes da broca PDC podem ser vistos na Figura 9. Os cortadores cisalham as rochas camada por camada e são dispostos nas aletas das brocas na forma de pastilhas, manufaturadas com substrato de carboneto de tungstênio, com a superfície de corte revestida por uma camada de diamantes policristalinos. O fluido de perfuração circula pelos jatos da broca (PLÁCIDO; PINHO, 2009).

A geometria das brocas PDC pode se adequar às características de corte da superfície perfurada. Ademais, são comuns os ajustes implementados pelos projetistas de brocas nos números de cortadores, posição, dimensões, ângulos geométricos da ferramenta, entre outros. As modificações melhoram os parâmetros de corte desejados, além de prolongar a vida útil da broca, reduzindo a frequência

de troca, que é especialmente importante nas perfurações *offshore*, onde as operações de substituição são muito onerosas (PLÁCIDO; PINHO, 2009; GAO, 2017).

Figura 9 - Exemplo de broca de diamante policristalino



Fonte: Adaptado de Hareland et al. (2009)

2.4 DESEMPENHO DO SISTEMA DE PERFURAÇÃO

Para avaliar o desempenho do sistema de perfuração é fundamental conhecer e monitorar vários parâmetros. O peso sobre a broca, a velocidade de rotação da coluna de perfuração, a vazão do fluido de perfuração, a litologia (características de textura, cor e composição mineralógica da rocha) são alguns parâmetros de perfuração muito relevantes e que afetam a taxa de penetração e o torque. Devido às características geológicas de cada poço, a tarefa de combinar os principais parâmetros para maior eficiência, torna este processo um grande desafio aos engenheiros de perfuração (AADNOY; LOOYEH, 2011). A combinação inadequada pode gerar gastos desnecessários de energia, além da redução na vida útil da broca e dos componentes de fundo de poço devido, principalmente, ao desgaste resultante das vibrações excessivas na estrutura (GANDELMAN, 2012).

Os atrasos, decorrentes de falhas no processo de perfuração ou a sua baixa eficiência, afetam de forma bastante negativa o orçamento das operadoras de poços de petróleo e gás. O custo diário para o aluguel de uma plataforma de perfuração pode chegar a US\$ 600 mil (AMORIM JUNIOR, 2008; MORAIS, 2013).

Outra importante característica na relação entre os parâmetros de perfuração é o caráter transiente do processo. Ou seja, para diferentes profundidades as respostas tendem a produzir leituras não lineares e sem qualquer relação, o que dificulta ainda mais o atingimento do ponto de máxima eficiência operacional. Dos parâmetros operacionais mais relevantes para a melhora na taxa de penetração da broca, a vazão do fluido de perfuração é de extrema importância para a limpeza adequada do poço. Assim, a vazão é definida em projeto para suprir primordialmente essa demanda e, não necessariamente, no aumento do torque e da taxa de penetração. Considerando que as características litológicas são inerentes às estruturas rochosas e não podem ser manipuladas, a velocidade de rotação da coluna e o peso sobre a broca são os únicos parâmetros disponíveis para o controle da taxa de penetração (GANDELMAN, 2012; HOSSAIN; AL-MAJED, 2015). Os fundamentos dos principais parâmetros de perfuração são discutidos a seguir.

2.4.1 Taxa de Penetração da Broca

A taxa de penetração da broca, ou ROP, é a medida da velocidade com a qual a broca atravessa as rochas. Ela pode ser calculada dividindo a distância perfurada pela unidade de tempo, que usualmente é em pés ou metros por hora. Quanto maior for a ROP, menor o tempo do processo e, conseqüentemente, menor o custo operacional. A taxa de penetração é dependente de vários parâmetros de perfuração. O objetivo dos engenheiros é alcançar alta efetividade de penetração da broca sem comprometer sua capacidade técnica. Por isso, condições de perfuração mais precisas são importantes para saber se a broca escolhida é apropriada para perfurar a formação rochosa desejada (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015).

O aumento na ROP sempre resulta no incremento da quantidade de cascalhos no espaço anular. Para garantir uma boa limpeza do poço durante a perfuração com alta ROP, tanto a vazão do fluido de perfuração quanto a velocidade de rotação da coluna devem estar ajustados. Caso os limites das duas variáveis

sejam atingidos, o ideal seria diminuir a ROP, que apesar do impacto inicial no aumento do custo de perfuração com a taxa de penetração menor, a diminuição do torque e do arraste pode ser vantajosa no longo prazo em relação à redução da ROP, limitando a incidência de futuras falhas (MITCHELL; LAKE, 2006).

2.4.2 Torque

O torque é definido como o produto da força tangencial na broca pela posição radial do ponto de aplicação da força, e a unidade utilizada em campo é N.m ou lbf.pé (KUNG, 2016). No caso da perfuração de rochas, o torque é o momento necessário para girar a broca e é gerado a partir da interação entre os cortadores da ferramenta e a superfície sendo perfurada. Essa interação decorre da aplicação de peso e rotação à broca.

O conhecimento do torque na broca é muito importante para o controle e o monitoramento do processo de perfuração, além de prevenir problemas operacionais recorrentes, como o aumento de desgaste na ferramenta. Há um grande desafio de se prever o torque em brocas utilizando modelos matemáticos, ou simulando perfurações em bancadas, em regiões muito profundas, como é o pré-sal brasileiro. Já que nessas situações, as brocas perfuram no mesmo poço várias camadas rochosas com características de resistência à perfuração, pressão e temperatura distintas, dificultando o monitoramento da eficiência da transferência de movimento da coluna de perfuração para a broca (GANDELMAN, 2012; HOSSAIN; AL-MAJED, 2015; KUNG, 2016).

O aumento exagerado do torque pode ocorrer devido ao atrito lateral com a parede do poço, já a redução do torque é, geralmente, causada pelo enceramento, que ocorre quando sedimentos moles e pegajosos cobrem a broca, restringindo e até perdendo a sua capacidade de corte. O enceramento da broca é comum em casos onde: i/ se utilizam brocas para formações duras, com cortadores pequenos, em formações moles; ii/ quando há circulação inadequada de fluido de perfuração; ou iii/ na utilização de WOB excessivo (CARRAPATOSO, 2011).

A aplicação de WOB excessivo gera o aumento considerável no torque, que tem como consequência primária, o enterramento dos cortadores da broca sem o

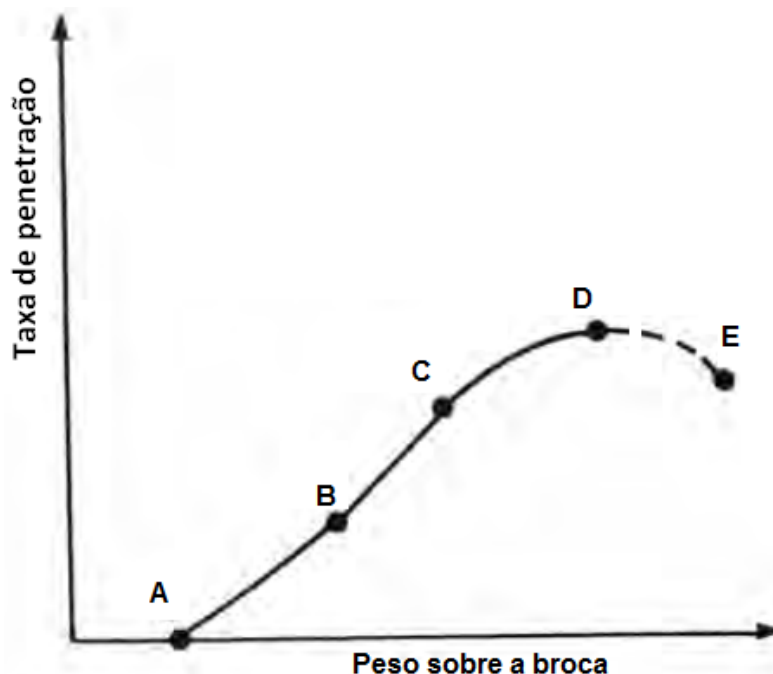
incremento desejado na taxa de penetração da ferramenta (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015).

2.4.3 Peso sobre a Broca

O peso sobre a broca, ou WOB, representa o peso aplicado à broca para perfurar e é calculado a partir da carga no gancho. O peso sobre a broca é uma fração do peso total da coluna de perfuração. Ou seja, uma parte do peso da estrutura de perfuração, e dos seus componentes, é suportada pelo gancho da plataforma, e todo resto é transferido diretamente à broca. O peso sobre a broca tem ação direta sobre a taxa de penetração. Quanto maior o peso aplicado, maior será a pressão exercida sobre a superfície perfurada (GANDELMAN, 2012).

A Figura 10 mostra o comportamento, normalmente, observado em superfícies submetidas ao aumento do peso aplicado sobre a broca, mantendo os demais parâmetros de perfuração constantes.

Figura 10 - Taxa de penetração versus Peso sobre a broca



Fonte: Adaptado de Bourgoyne Jr et al. (1991)

Antes do ponto A, a broca não consegue penetrar devido à resistência mecânica da formação rochosa. O aumento do peso sobre a broca propicia o

crescimento rápido e praticamente linear na ROP passando pelo ponto **B** até o ponto **C**. Entretanto, os ganhos na taxa de penetração a partir do ponto **C** são reduzidos. Após o ponto **D**, a taxa de penetração declina, mesmo para valores de WOB elevados. A redução na taxa de penetração no segmento DE decorre, principalmente, da baixa eficiência na limpeza do fundo do poço e do acúmulo de cascalhos na região anular (BOURGOYNE JR et al., 1991; GANDELMAN, 2012).

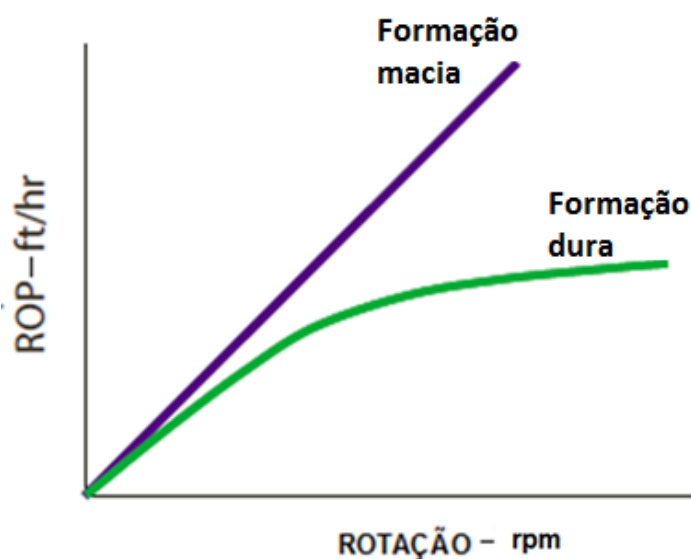
Segundo Lyons, Plisga e Lorenz (2015), o WOB deve ser suficiente para superar a resistência da rocha. Se for excessivo, reduz a vida útil da broca devido ao aumento da taxa de desgaste na ferramenta.

2.4.4 Velocidade de Rotação

A velocidade de rotação representa a velocidade angular da coluna de perfuração sobre o seu próprio eixo. A velocidade de rotação, junto com o peso sobre a broca, tem grande influência na taxa de penetração. Normalmente, quanto maior for a rotação empregada, maior é a ROP, ao mesmo tempo em que se aumentará o desgaste da broca (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015). Considera-se que as medições da velocidade de rotação são precisas, desde que a configuração do sistema de aquisição tenha sido ajustada corretamente. Segundo Tavares (2006), a velocidade de rotação é usualmente fornecida pela plataforma de perfuração, mas é possível instalar sensores de rotação no *Top Drive* ou na mesa rotativa.

A velocidade de rotação é influenciada, principalmente, pelo tipo da broca e pela resistência da superfície perfurada. A Figura 11 mostra como a taxa de penetração da broca varia com a velocidade de rotação da coluna para diferentes tipos de formações rochosas. A falta de linearidade em formações mais duras é devido ao tempo necessário para quebrar rochas de maior resistência à compressão. Além de problemas com a limpeza de fundo de poço, situação similar à que foi relatada no segmento **DE** da Figura 10, para elevados pesos aplicados sobre a broca (BOURGOYNE JR et al., 1991). Para as brocas PDC, o recomendável é utilizar rotações mais altas possíveis, com o valor de WOB constante. Entretanto para o caso de formações rochosas muito duras, um valor elevado de velocidade de rotação pode desgastar prematuramente a ferramenta, mesmo tratando-se de um revestimento de diamante policristalino (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015).

Figura 11 - Variação da taxa de penetração em relação à velocidade rotativa



Fonte: Adaptado de Hossain e Al-Majed (2015)

2.4.5 Vazão do Fluido

A vazão do fluido de perfuração é o volume de fluido, por unidade de tempo, bombeado para o interior do poço. O fluido tem como função principal a movimentação dos cascalhos, gerados durante a perfuração das rochas, até a superfície da plataforma. Segundo Lyons, Plisga e Lorenz (2015), o fluido de perfuração também desempenha outros papéis importantes na eficiência operacional e na vida útil do conjunto de componentes localizados na extremidade inferior da coluna (BHA):

1/ O atrito provocado pelo contato entre a broca, a parede do poço e os elementos do BHA (comandos e motor de fundo) gera calor que, entre outras coisas, aumenta a propensão de falhas prematuras na broca além de danos à coluna. Então, o fluido auxilia na dissipação do calor para longe dos locais de atrito;

2/ O fluido também lubrifica a região entre a superfície de corte do cortador da broca e da formação perfurada, além de servir como lubrificante entre a parede do poço e a coluna de perfuração, reduzindo o torque e o arrasto;

3/ A limpeza da broca e da parte inferior do poço é outra função relevante do fluido de perfuração, pois se os detritos ou cascalhos gerados na face da broca não forem imediatamente removidos, aglutinarão na broca, retardando a penetração efetiva da ferramenta nos cortes subsequentes;

4/ Fixação das paredes do poço, evitando desmoronamentos. A formação perfurada em um intervalo de profundidade não revestida pode estar sujeita ao colapso, o que pode comprometer a perfuração e causar acidentes. Devido à porosidade das rochas, o fluido penetra na formação circundante e forma em poucas horas uma camada que ajuda a consolidar as paredes do poço;

5/ Concede pressão hidrostática ao poço, impedindo que aconteça o influxo de fluidos da formação para dentro da região perfurada, fenômeno conhecido como *kick* (KUNG, 2016).

2.4.6 Litologia

Junto com a velocidade de rotação da broca e o WOB, a litologia é fator muito importante na perfuração. Distintas litologias necessitam de valores de energia diferentes para serem perfurados pela broca. Obviamente, a litologia, diferentemente de outros parâmetros, não é uma variável que possa ser manipulada, mas o conhecimento das características e da composição da formação rochosa que se pretende perfurar é fundamental para que se atinja a maior eficiência possível no processo de perfuração, com baixo custo e segurança operacional. Algumas rochas podem suportar quantidades maiores de carga à medida que se deformam, fenômeno conhecido como endurecimento por encruamento, que é característico de rochas dúcteis, como mármore e calcário. Por outro lado, as rochas com comportamento frágil se desintegram e fraturam em pequenos pedaços após experimentarem cargas superiores aos seus limites máximos de resistência. Os folhelhos de quartzo-ilitico, rochas comuns em perfurações de óleo e gás, e as rochas ígneas compactas são exemplos de formações com comportamento frágil (SCHULTZ, 2019).

2.5 FURAÇÃO DE MATERIAIS FRÁGEIS

A ductilidade pode ser definida como a capacidade que o material tem de absorver sobrecargas e de sofrer deformações permanentes sem se fraturar (BUDYNAS; NISBETT, 2011). Todos os tipos de materiais apresentam natureza dúctil, por mais frágeis que possam ser. O material dúctil apresenta o escoamento, seguido de deformação plástica e, por fim, a falha, enquanto o material frágil somente experimenta comportamento elástico até a sua ruptura repentina (BUDYNAS; NISBETT, 2011; LIU; WANG; ZHANG, 2020).

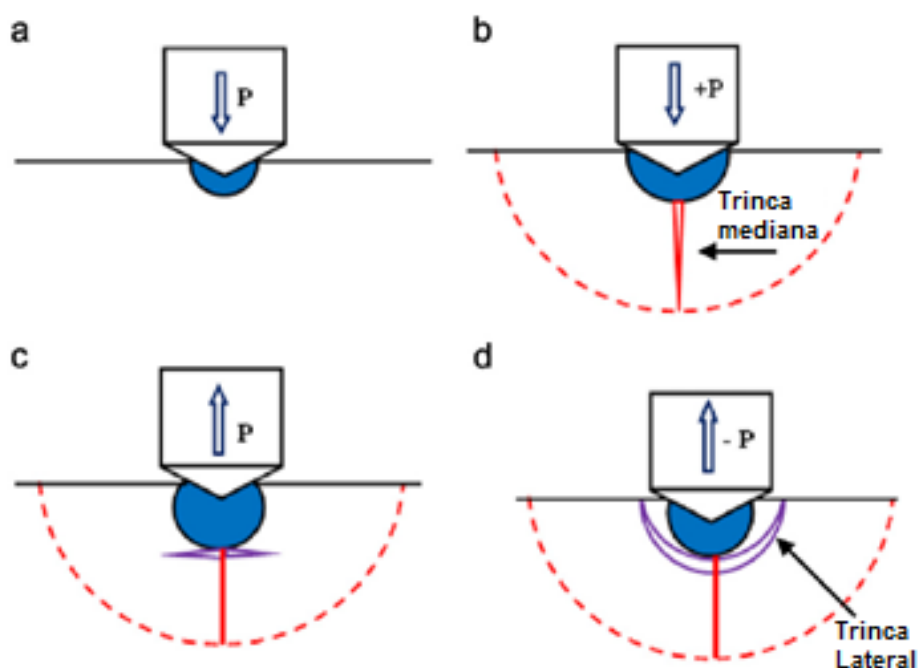
Vários tipos de rochas encontradas em poços de petróleo e gás apresentam comportamento frágil parecido com o do vidro, silício, carboneto de tungstênio e germânio, quando submetidas ao processo de furação. Ou seja, estas classes de materiais duros e quebradiços respondem às tensões de tração com mecanismos de fratura antes que se processe qualquer tipo de deformação plástica. Estas características são recorrentes nas rochas em razão das suas estruturas de formação, com muitos vazios ou poros, que facilitam a propagação de microfissuras e trincas superficiais (SCHROETER, 1997; SCHULTZ, 2019).

Existem dois tipos principais de processos de fabricação com arrancamento de material, são eles: dúcteis ou frágeis. Na furação dúctil, a remoção de material é devida ao escoamento plástico que ocorre na forma de cavacos cisalhados. Já na furação frágil ocorre a remoção através da propagação e interseção de trincas (BIFANO; DOW; SCATTERGOOD, 1991; GOEL et al., 2013).

Para a compreensão do mecanismo de formação de trincas em materiais frágeis durante a furação, Arif, Rahman e San (2011) utilizaram o indentador penetrando em superfície de vidro como é mostrado na Figura 12. Conforme a ponta do indentador penetra na superfície sob carga reduzida, o material mostra pouca elasticidade que é acompanhada da formação de zona deformada plasticamente com forma semicircular. Com o aumento gradativo da carga sobre o indentador, uma trinca é originada a partir da porção inferior da zona plástica com orientação axial, ela é denominada trinca mediana. O aparecimento do segundo sistema de trincas ocorre no descarregamento do indentador, no qual as trincas laterais crescem e se propagam na direção da superfície causadas, principalmente, pela ação das tensões

residuais na região. Materiais frágeis se notabilizam por pouca resistência à tração e trincas (ARIF; RAHMAN; SAN, 2011).

Figura 12 - Indentação sobre material frágil



Fonte: Adaptado de Arif, Rahman e San (2011)

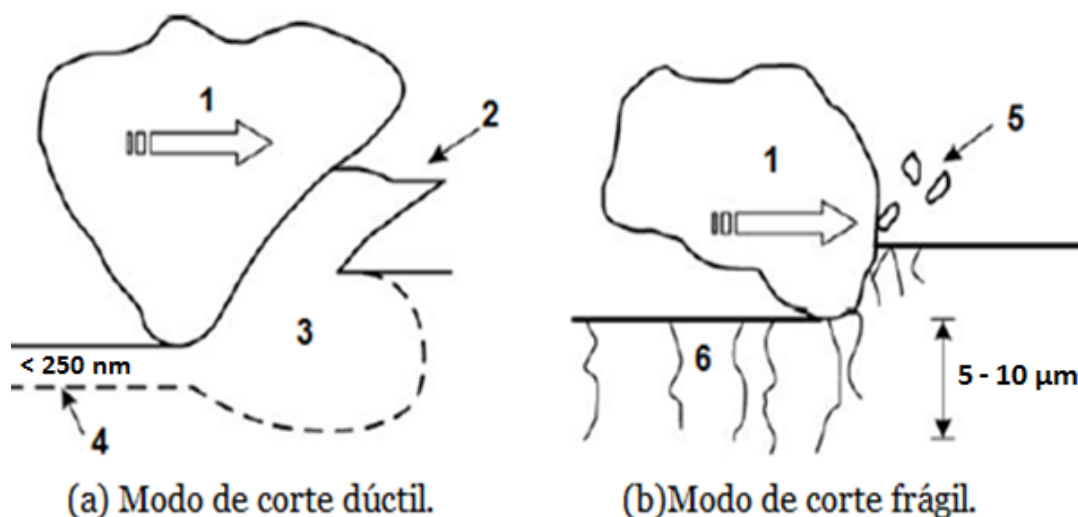
2.5.1 Mecanismo de Corte Dúctil

Segundo Antwi, Liu e Wang (2018), uma solução encontrada para a furação de materiais frágeis é conhecida como modo de corte dúctil (DMC). O conceito se baseia na hipótese de que todo material frágil passará pela transição dúctil-frágil no corte com a espessura do cavaco não deformado (UCT), abaixo do valor crítico de ruptura. O processo DMC se tornou promissor por proporcionar melhor qualidade superficial no material furado, menos zonas suscetíveis a fissuras, além da redução no tempo de operação e, conseqüentemente, no custo.

O processo DMC é exitoso para condições de avanços e profundidades de corte que não excedam alguns poucos micrômetros. Devido a esta complexidade, algumas máquinas foram desenvolvidas especialmente para desempenhar esta função com melhores características de precisão, rigidez, resolução, vibração além de ambiente com maior controle de temperatura (SCHROETER, 1997; BELTRÃO, 1998). A comparação entre o processo DMC e BMC (modo de corte frágil) em

materiais frágeis é demonstrado na Figura 13. No caso da remoção da camada metalizada dúctil pelo processo DMC na Figura 13(a) originou-se uma região com alta pressão de contato. Já no processo BMC da Figura 13(b) é possível observar os danos na subsuperfície em profundidades na ordem de 5-10 μm abaixo da região de contato devido à propagação de trincas (ANTWI, LIU, WANG, 2018).

Figura 13 - Comparação entre modo de corte dúctil e frágil

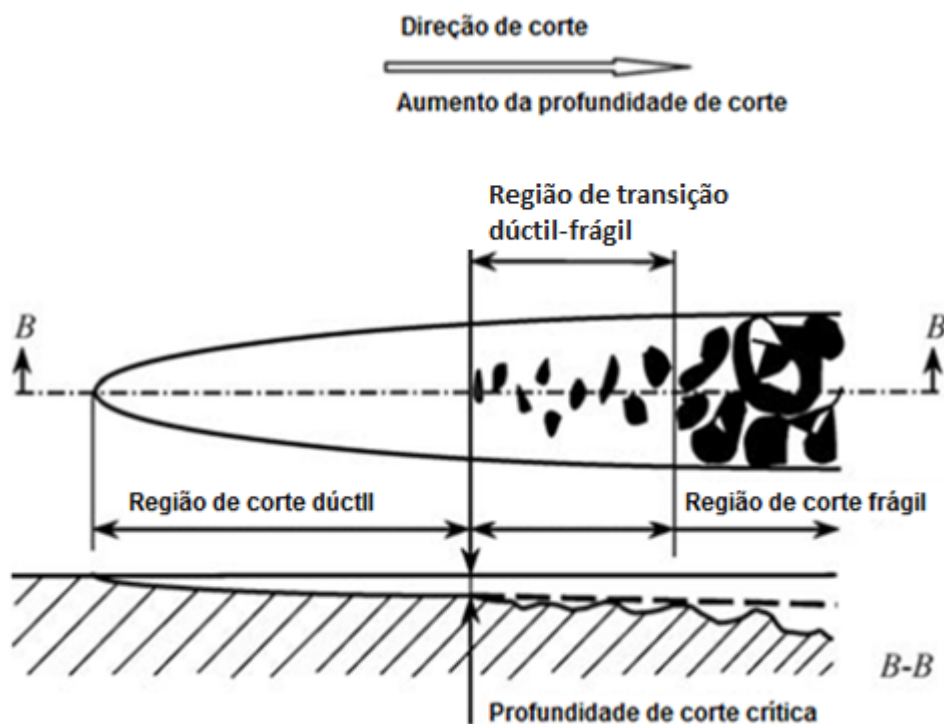


1 - Grão abrasivo ; 2 - Remoção dúctil de cavaco ; 3 - Fase metálica
4 - Camada usinada ; 5 - Remoção frágil de cavaco ; 6 - Microtrincas

Fonte: Adaptado de Antwi, Liu e Wang (2018)

A natureza da transição dúctil-frágil não é muito clara. Alguns autores defendem que a transição depende das propriedades do material, magnitude da força aplicada, da velocidade de corte e do volume de material removido. Outra visão afirma que a transição dúctil-frágil depende da relação entre a orientação cristalográfica e a direção do corte (NAKASUJI, 1990; ZHOU et al., 2002). Além disso, a maior profundidade de corte resultaria em espessura do cavaco não deformado (UCT) maior, o que pode levar à remoção do material dentro da região de transição dúctil-frágil. A Figura 14 mostra a profundidade de corte crítica encontrada para o processo de riscamento em superfície de carboneto de tungstênio, onde o valor médio dos oito testes realizados foi de aproximadamente 4,76 μm (LIU et al., 2004).

Figura 14 - Transição dúctil-frágil em processo de riscamento em carboneto de tungstênio



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2004)

Nos trabalhos mencionados, o que se deseja é o controle da transição dúctil-frágil evitando com que as trincas se propaguem. No caso de perfuração de poços de petróleo e gás, se pretende controlar a quebra do material, mas não propriamente evitar a zona frágil da rocha perfurada.

2.6 FUNDAMENTOS DE PERFURAÇÃO DE ROCHAS

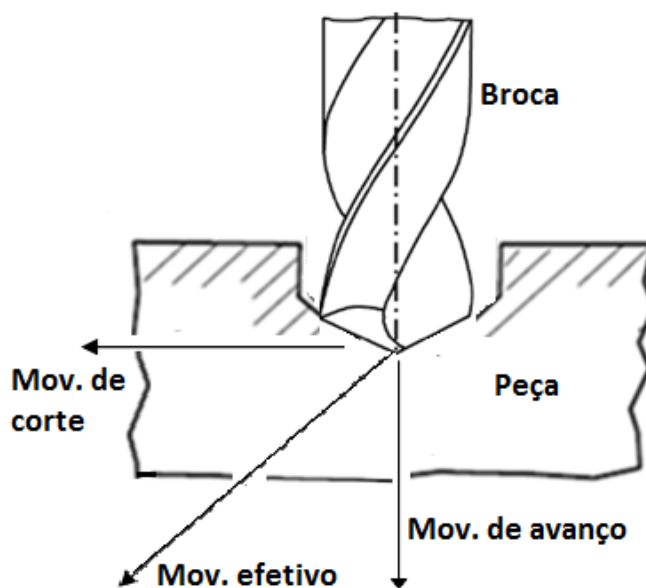
A perfuração de rochas é empregada em diversos segmentos da engenharia e geologia, tais como: abertura de orifícios para carregamento de explosivos para detonação de minas, construção de túneis para transporte, produção de pedras de construção, drenagem de água em superfície rochosas, monitoramento da deformação em maciços rochosos, entre outros (ZHANG, 2016).

Entre os principais métodos empregados em perfurações de rochas, destacam-se os métodos: percussivos, rotopercussivos e rotativos. O método percussivo trata-se do processo de golpear uma ferramenta pontiaguda metálica, normalmente manufaturada em aço de alta resistência mecânica, contra a superfície rochosa para execução de furos. O deslocamento do pistão, que é o mecanismo que

fornece energia ao sistema, rotaciona parcialmente a ferramenta, cada vez que a estrutura de perfuração colide com as rochas. No método rotopercussivo, o movimento de rotação é executado por um sistema independente, propiciando perfurações mais versáteis e rápidas, apesar de que as estruturas rotopercussivas são, geralmente, mais pesadas e com custos operacionais superiores ao método percussivo. A perfuração de rochas abordada neste trabalho é do tipo rotativa e consiste na fragmentação localizada por meio de brocas, submetidas à rotação e força axial, que promovem a abertura de volume, normalmente, cilíndrico na superfície perfurada (GERALDI, 2011).

Para assimilar o processo de perfuração rotativo é necessário entender os fundamentos do mecanismo de furação. A Figura 15 representa os principais movimentos relativos envolvidos no processo de furação. O *Movimento de corte* é o movimento entre a ferramenta e a peça, que provoca a remoção do cavaco durante uma única rotação, ou curso da ferramenta. O *Movimento de avanço* é o movimento entre a ferramenta e a peça que, juntamente com o movimento de corte, provoca a remoção contínua do cavaco da peça, durante várias rotações. O *Movimento efetivo de corte* é o movimento entre a ferramenta e a peça que resulta no processo de corte. No caso da furação, o movimento efetivo de corte é a resultante da composição dos movimentos de avanço e corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

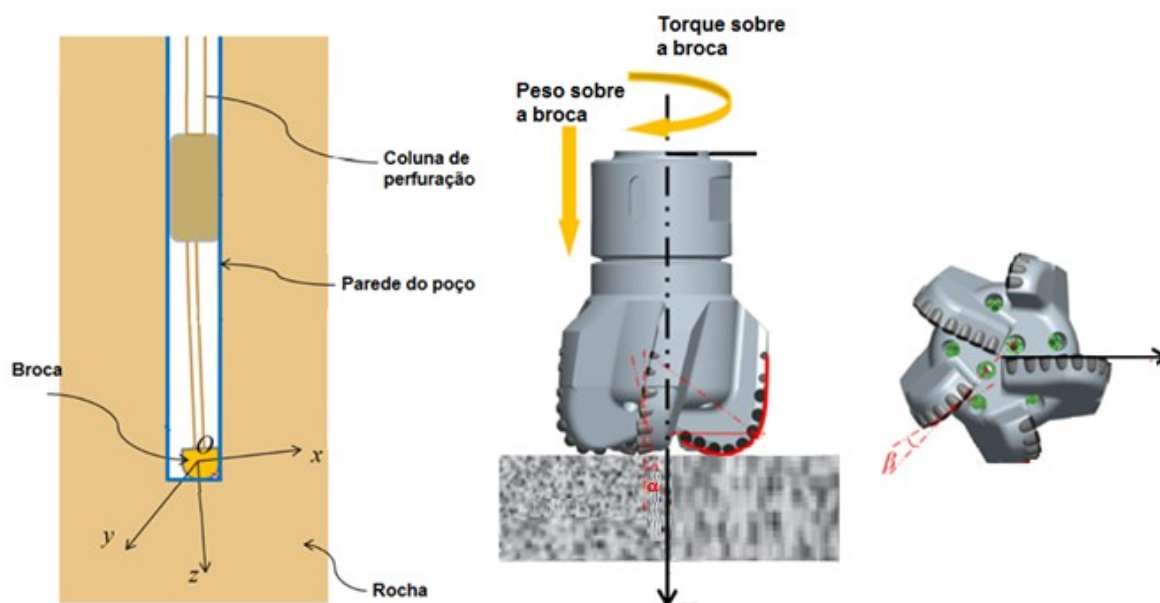
Figura 15 - Movimentos de corte em brocas



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2001)

A aplicação de brocas convencionais helicoidais com dois gumes de corte, como da Figura 15, em perfuração de rochas, localizadas a vários quilômetros de profundidade da superfície, geraria impactos sensíveis na eficiência do processo. O principal deles está relacionado à capacidade de corte da ferramenta. A Figura 16 mostra uma situação recorrente em perfuração de poços: o corte irregular. A instabilidade do terreno somada às características litológicas das rochas demandam que as brocas de perfuração, ao contrário das brocas convencionais, tenham a capacidade de corte lateral mais apurada, como ocorre no caso das fresas, ferramentas muito utilizadas na usinagem de metais e que possuem arestas de corte dispostas simetricamente ao redor do seu eixo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003; KLOCKE; 2011). A concepção de projeto das brocas PDC incluem características geométricas que fazem da ferramenta, uma das mais versáteis nas operações de perfuração de poços de óleo e gás ao redor do mundo (MA et al., 2018).

Figura 16 – Situação de perfuração em brocas PDC



Fonte: Adaptador de Ma et al. (2018)

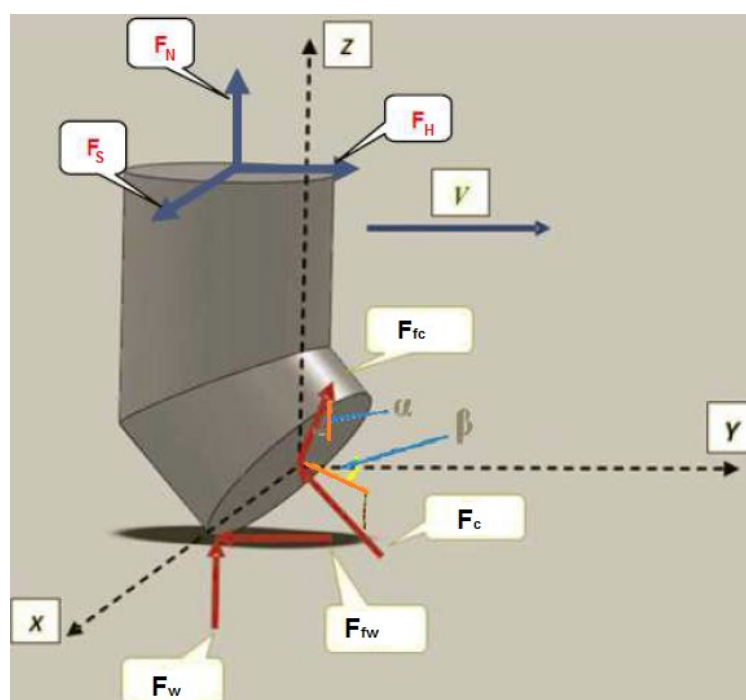
Na subseção 2.6.1 são discutidas as forças presentes na broca PDC. É importante salientar que esta é uma broca vazada com várias arestas de corte circulares que alteram a capacidade de corte por gume em relação às brocas convencionais, mas não a força global despendida pelo sistema. Além disso, é

possível avaliar como as mudanças nos valores do ângulo de ataque (α) do ângulo de saída lateral (β) e do coeficiente de atrito (μ) entre a superfície rochosa e um único cortador podem influenciar na eficiência de perfuração da broca. A simbologia original dos ângulos do cortador PDC desenvolvida na subseção 2.6.1 é empregada, também, nos ângulos análogos da subseção 2.6.2, a fim de padronizar as equações propostas. Além disto, os parâmetros e os símbolos utilizados nas equações deste trabalho são os mesmos que a indústria de perfuração de poços de petróleo e gás emprega nas suas áreas operacionais.

2.6.1 Forças nas Brocas de Diamante Policristalino Compacto

Rajabov et al. (2012) desenvolveu um modelo para prever a força de corte horizontal para determinada força normal, com os dados de ângulo de ataque, de ângulo de saída lateral e o coeficiente de atrito do cortador com a rocha conhecidos. O modelo pode ser adaptado para toda broca PDC para a avaliação do torque para um dado WOB durante a perfuração. Conforme mostrado na Figura 17, o modelo proposto por Rajabov et al. (2012) é baseado no equilíbrio estático das forças que agem no cortador PDC quando da interação com a rocha.

Figura 17 - Forças em três dimensões atuando no cortador PDC



Fonte: Adaptado de Rajabov et al. (2012)

As seguintes forças externas atuam no cortador durante a perfuração: força de corte perpendicular à superfície do cortador (F_C), força de atrito na interface cortador/rocha (F_{fc}), força de desgaste atuando perpendicularmente ao cortador (F_w) e a força de atrito em decorrência do desgaste entre o plano de desgaste e a rocha (F_{fw}). O desenvolvimento matemático do modelo pode ser visto no Apêndice A.

De acordo com Rajabov et al. (2012), caso não haja desgaste no cortador PDC, a força horizontal (F_H) atuante pode ser definida pela Equação 1 com os valores conhecidos da força normal (F_N), do ângulo de ataque (α), do ângulo de saída lateral (β) e do coeficiente de atrito (μ). Considerando a geometria da ferramenta em três dimensões:

$$F_H = F_N \cos\beta \frac{(1 - \mu \operatorname{tg}\alpha)}{(\mu + \operatorname{tg}\alpha)} \quad (1)$$

Se o ângulo de saída lateral for nulo, a Equação 1 assume a forma da Equação 2:

$$F_H = F_N \frac{(1 - \mu \operatorname{tg}\alpha)}{(\mu + \operatorname{tg}\alpha)} \quad (2)$$

A Equação 2 é semelhante àquela do modelo desenvolvido por Kuru e Wojtanowicz (1988). Após os primeiros estudos de Rajabov et al. (2012), surgiram algumas inconsistências entre o coeficiente de atrito e o ângulo de ataque na utilização da Equação 1, mesmo para situações onde a superfície de contato da rocha com o cortador não variavam. Para eliminar o problema foi adicionado o coeficiente C , que ajusta o coeficiente de atrito para gerar o mesmo valor para todos os ângulos de ataque. Com a adição do novo coeficiente, a Equação 1 assume a forma da Equação 3:

$$F_H = F_N \cos\beta \frac{(C - \mu \operatorname{tg}\alpha)}{(\mu + C \operatorname{tg}\alpha)} \quad (3)$$

O coeficiente C depende tanto do ângulo de ataque quanto do tipo da rocha perfurada. A Equação 4 é o caso prático de aplicação do coeficiente C para amostras de um tipo de arenito conhecido pelo nome de *Torrey Buff*.

$$C = 0,000059\alpha^3 - 0,003069\alpha^2 + 0,078424\alpha + 0,188719 \quad (4)$$

Os resultados dos testes mostraram que os dados calculados pelo novo modelo da Equação 3 ficaram muito próximos aos dados experimentais, principalmente, para os casos de cortadores com ângulos de ataque menores. O novo modelo também pode ser expandido para prever o torque na perfuração de uma broca PDC completa, desde que se integre a Equação 3 em relação ao seu raio, respeitando as questões relativas à distribuição de carga, ao desgaste do cortador da broca e as particularidades de projeto da ferramenta (KURU; WOJTANOWICZ, 1988; RAJABOV et al., 2012).

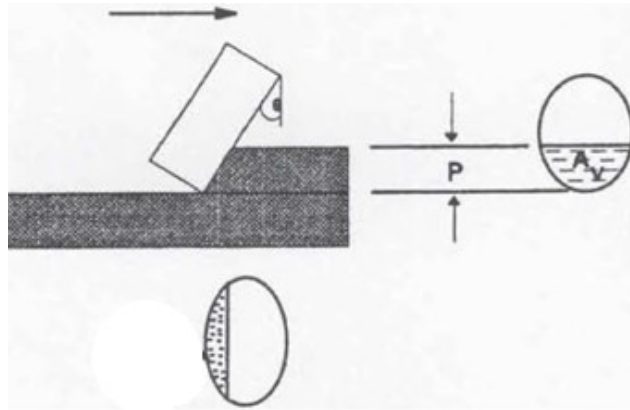
2.6.2 Modelo para Previsão da Taxa de Penetração da Broca

A previsão da taxa de penetração é tópico fundamental na área de petróleo e gás, e foi explorada por pesquisadores a partir da segunda metade do século XX. Vários relacionaram a taxa de penetração com o peso sobre a broca, a velocidade de rotação da coluna, a vazão do fluido, entre outros parâmetros de perfuração. Esses modelos desenvolvidos são, na verdade, equações empíricas limitadas para formações e cenários específicos e não podem ser generalizados para outras situações, podendo gerar interpretações imprecisas.

Hareland e Rampersad (1994) desenvolveram o modelo aplicável para todas as chamadas brocas de arrasto, como é o caso das brocas PDC. O foco desse estudo é na interação da rocha com um único cortador da broca. Todavia, vários novos recursos foram explorados nessa modelagem, entre eles: ação dinâmica do cortador, desgaste do cortador, coeficientes litológicos e condições de operação. O modelo descrito foi desenvolvido sob a suposição de que há ação de aragem ou riscamento do cortador na rocha, muito similar ao que ocorre na transição dúctil-frágil de processos de fabricação descritos no item 2.5.1. A profundidade em que cada cortador penetra na rocha tem relação com o número de cortadores, a

resistência à compressão da rocha, ao peso aplicado sobre a broca e a área de contato projetada de cada cortador. A Figura 18 retrata a área comprimida da rocha formada pelo contato entre a rocha e o cortador PDC, durante o processo de perfuração (HARELAND; RAMPERSAD, 1994).

Figura 18 - A área comprimida da rocha (A_v) num cortador PDC



Fonte: Hareland e Rampersad (1994)

A taxa de penetração ROP (pés/hora) é definida pela Equação 5:

$$ROP = \frac{14,14NCnA_v}{d} \quad (5)$$

Sendo:

NC = número de cortadores;

A_v = área comprimida da rocha (polegada quadrada);

d = diâmetro da broca (polegada);

n = velocidade de rotação da broca (rpm).

A Equação 6 calcula a área comprimida da rocha:

$$A_v = \cos\beta \operatorname{sen}\alpha \left[\left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2P}{\cos\alpha d_c} \right) - \left(\frac{Pd_c}{\cos\alpha} - \frac{P^2}{\cos\alpha^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Pd_c}{2\cos\alpha} \right) \right] \quad (6)$$

A profundidade de corte tem relação com o peso aplicado à broca, o diâmetro do cortador PDC e a resistência à compressão da formação rochosa. A

UCS (*unconfined compression strength*) é a resistência à compressão não confinada da rocha, por meio dela é possível calcular a máxima resistência que a estrutura pode suportar na pressão atmosférica (AADNOY; LOOYEH, 2011). Desta forma, a Equação 7 determina a profundidade de corte da broca (em polegadas):

$$P = \frac{2WOB}{\pi\sigma_p d_c} \quad (7)$$

Sendo:

d_c = diâmetro do cortador (polegada);

σ_p = UCS da superfície perfurada (libra-força por polegada quadrada).

Os primeiros resultados demonstraram que a ROP não variava linearmente com a velocidade de rotação da broca como previa a Equação 5, com os outros parâmetros mantidos constantes. Esse panorama sugeriu a possibilidade de que alguns fatores não tenham sido levados em consideração na formulação do modelo proposto pelos dois pesquisadores.

Segundo Hareland e Rampersad (1994), devido a complexidade do processo de interação broca-rocha, é provável que existam vários fenômenos que não podem ser explicados com precisão na modelagem teórica e causem desvios quando empregados em situações reais. Entre os principais, podem-se citar: taxa de deformação da rocha, variação microscópica na resistência ao desgaste, limpeza das brocas e imperfeições na geometria do cortador. A alternativa proposta para superar estas imprecisões foi através da utilização de fatores de correção empíricos (Equação 8):

$$COR = \frac{a}{n^b WOB^c} \quad (8)$$

Onde:

a = fator de correção empírico da litologia;

b = fator de correção da rotação da broca;

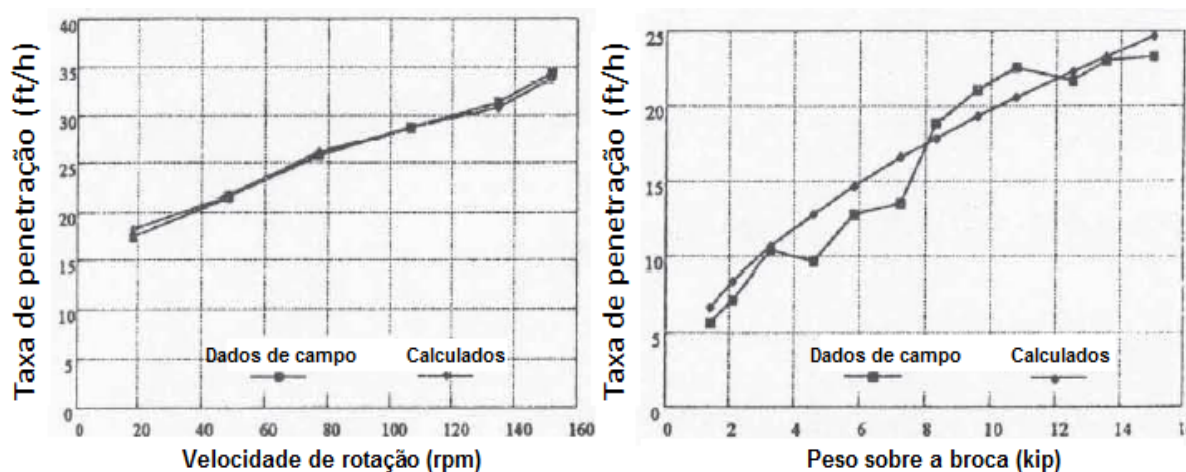
c = fator de correção empírico do WOB.

A ROP teórica da Equação 5 é então multiplicada pelo fator de correção da Equação 8 para obter a ROP verdadeira da Equação 9:

$$ROP = \frac{14,14NCnA_vCOR}{d} \quad (9)$$

A Figura 19 mostra a aplicação da Equação 9 em brocas de arrasto perfurando superfícies de folhelho *Cartoosa*. Os resultados indicam boa relação entre os dados calculados e os dados de campo, mostrando que o modelo da Equação 9 pode ser uma opção adequada para a previsão da taxa de penetração em brocas novas.

Figura 19 - Dados calculados pelo modelo versus dados de campo



Fonte: Hareland e Rampersad (1994)

2.7 REDUÇÃO DE ESCALA

A possibilidade de conversão de dados de modelo em tamanho reduzido e acessível para a obtenção de informações ou características de um protótipo maior e custoso é um dos benefícios da análise dimensional. Modelo e protótipo possuem semelhança geométrica se todas as dimensões superficiais do modelo tiverem o mesmo fator de redução (n_L) em comparação com o protótipo. Comprimentos, áreas e volumes do protótipo, portanto, podem ser reduzidos em escalas n_L , n_L^2 e n_L^3 , respectivamente, para a concepção de um modelo. Para a completa similaridade geométrica, todos os ângulos do protótipo devem ser preservados no modelo. A semelhança cinemática é atingida quando o modelo e o protótipo detêm a

similaridade geométrica e a similaridade dos movimentos, como: tempo, velocidade e aceleração. A semelhança dinâmica é alcançada quando os dois corpos possuem as similaridades geométrica, cinemática além de equivalentes razões de forças atuando em ambos (BIRK, 2019; HELLER, 2011; WHITE, 2011).

A teoria de Análise Dimensional e o método *Pi de Buckingham* estão contidos no Apêndice B.

2.7.1 Bancadas Experimentais

Alguns laboratórios ao redor do mundo desenvolveram projetos de bancadas com objetivo de redução em escala de plataforma real para unidade piloto, ou bancada de laboratório, com foco principalmente na compreensão dos diferentes modos de vibrações das colunas, bem como das combinações de parâmetros durante as operações de perfuração. No Quadro 1 pode ser visualizado o levantamento de propostas formalizadas nos últimos dez anos. Na análise, é delimitado o objetivo de cada trabalho, as configurações dos dispositivos, além de examinar como foi executada a interação da broca com a rocha.

Quadro 1 - Plataformas em escala reduzida

(continua)

Referências	Foco do Trabalho	Detalhes da Configuração	Interação Broca-Rocha
Forster, Macfarlane e Dinnie (2010)	Bancada de teste projetada com o objetivo de compreender e quantificar o comportamento de uma ferramenta de amortecimento das vibrações mais prejudiciais à coluna de perfuração.	- Comprimento da coluna = 2000 mm - Diâmetro ext. da coluna = 5 mm - WOB = 9,8 - 34,3 N - Top Drive = 12 - 30 V motor DC - Vel. rotação = 330 rpm	-
Franca (2010)	Os dados de respostas dos experimentos demonstram a possibilidade de extrair parâmetros quantitativos relacionados às propriedades da rocha, condições das brocas e eficiência da perfuração, sem uma descrição precisa da geometria da broca.	- ROP = 0,01 - 100 mm/s - Vel. rotação = 10 - 400 rpm - Top Drive: Servomotor - Sistema de circulação composto por um coletor de pó e ar comprimido é usado para limpar a broca.	Broca de cones perfurando arenito e calcário
Forster (2011)	Experimento com objetivo de mitigar as vibrações torcionais com a introdução de excitação axial na coluna de perfuração.	- Comprimento da coluna = 1250 mm - Diâmetro ext. da coluna = 1 mm - WOB = 5 N - Top Drive = 0 - 30 V motor DC - Vel. rotação = 100 - 150 rpm - Vazão = 800 - 900 gpm - BHA representado por um eixo de 5 mm de diâmetro	As condições de atrito da broca foram representadas por uma estrutura cilíndrica de aço localizada no eixo BHA.

Quadro 1 – Plataformas em escala reduzida

(continuação)

Referências	Foco do Trabalho	Detalhes da Configuração	Interação Broca-Rocha
Esmaeili et al. (2012)	Um equipamento de perfuração e um sensor de vibração foram utilizados para monitorar e registrar algumas variáveis na perfuração, tais como: o WOB, a velocidade rotativa, a vibração da coluna de perfuração, entre outras. O incremento no WOB e na velocidade de rotação na estrutura aumentou a eficiência de perfuração.	- Comprimento da coluna = 524 mm - Diâmetro ext. da coluna = 40 mm - WOB máx = 784,5 N - Top Drive = 5,2 kW Servomotor - Vel. rotação = 120/240/360 rpm - Torque máx. = 30 Nm	Broca de cones de 2-3 polegadas perfurando arenito
Patil e Teodoriu (2013)	Configuração concebida para medição da influência das vibrações torcionais na coluna de perfuração.	- Comprimento da coluna = 5000 mm - Diâmetro ext. da coluna = 4 mm	Dispositivo de frenagem representa o atrito da broca
Kovalyshen (2014)	A pesquisa concluiu que a ação de corte da broca e a interação com a rocha são as principais fontes de vibrações torcionais.	- Vel. rotação = 10 - 400 rpm - Rigidez torcional = 0,05 - 14 Nm/rd - Top Drive: Servomotor - Ar em alta pressão é usado para remover os detritos.	Broca de arrasto, com 49 mm de diâmetro, perfurando calcário
Kapitaniak et al. (2015)	Nesse trabalho foram utilizados modelos matemáticos com intuito de prever as vibrações torcionais numa plataforma que simula uma operação em campo.	Diâmetro ext. da coluna = 10 mm WOB máx. = 850 - 2190 N Vel. rotação = 0,5 - 1370 rpm Rigidez torcional = 5,17 Nm/rd Top Drive: Motor DC Fluido de Perfuração: Água	Broca PDC e tricônica perfurando amostra de rocha
Perez, Karakus e Pellet (2016)	Experimento de perfuração utilizando as emissões acusticas para monitoramento do desgaste em uma broca de diamante impregnado.	WOB = 40000 N ROP = 0,1 - 13 mm/s TOB (torque na broca) máx. = 94 Nm Vel. rotação = 95,5 - 2387,3 rpm Sensor acústico: WDI-AST (40 dB)	Broca HR14 perfurando granito
Bavadiya et al. (2017)	Os resultados experimentais mostraram um aumento da vibração axial com o incremento no torque. Para limitar as vibrações laterais é preferível reduzir a velocidade de rotação e o WOB, em formações duras.	- Comprimento da coluna = 900 mm (alumínio 6061) - Diâmetro ext. da coluna = 9,5 mm - WOB = 44,5 - 222,4 N - Top Drive: Motor de 0,74 kW - Vel. rotação = 50 - 900 rpm - Fluido de perfuração: Água (145 psi e 3 gpm) - A bomba foi alimentada por um 1,12 kW 3-motor de fase.	Broca PDC de dois cortadores perfurando arenito macio e duro
Marquez e Teodoriu (2017)	Uma configuração, com um atuador simulando a interação da broca com a rocha, foi utilizada para investigar as vibrações torcionais numa coluna de perfuração vertical.	- Comprimento da coluna = 14500 mm - Diâmetro ext. da coluna = 3,2 mm (PVC)	Sistema de freio simula o movimento broca-rocha
Loeken et al. (2018)	O objetivo foi a automatização do controle dos parâmetros operacionais (ajuste do WOB e da velocidade de rotação) para reduzir as vibrações destrutivas em tempo real.	- Comprimento da coluna = 800 mm (alumínio) - Diâmetro ext. da coluna = 9,5 mm - Vel. rotação máx. = 1500 rpm - Top Drive: Motor DC sem escova (Torque máx = 8,59 Nm)	Broca PDC (diâmetro ext = 28,6 mm) perfurando amostras de rocha

Quadro 1 – Plataformas em escala reduzidas

(conclusão)

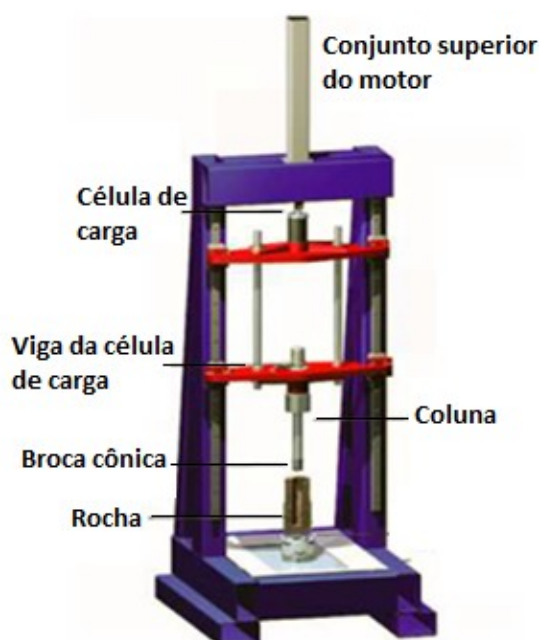
Referências	Foco do Trabalho	Detalhes da Configuração	Interação Broca-Rocha
Wiktorski et al. (2019)	Os resultados experimentais mostraram que uma câmera de alta velocidade, utilizada como sensor de deslocamento de fundo de poço, teve a capacidade de percepção das vibrações axiais, torcionais e laterais, que incidiram na coluna do modelo.	<ul style="list-style-type: none"> - Comprimento da coluna = 900 mm (alumínio 6061) - Diâmetro ext. coluna = 9,5 mm - Densidade = 2700 kg/m³ - Módulo de Young = 61,6 GPa - Limite Torcional = 18,9 Nm - Pressão de ruptura = 48,38 MPa - Vel. rotação máx. = 1500 rpm - WOB máx = 9 N - Resolução da câmera = 1,6 MP 	Broca com diâmetro externo de 28,6 mm
Khadisov et al. (2019)	Um sistema de algoritmos foi empregado para controle dos principais parâmetros de perfuração, além de servir para detecção de incidentes numa plataforma, baseado no desempenho da estrutura de perfuração.	<ul style="list-style-type: none"> - Comprimento da coluna = 920 mm (alumínio 6061 T6) - Diâmetro ext. da coluna = 9,5 mm - Módulo de Young = 68,9 GPa - Torque máx. = 24,7 Nm - WOB máx. = 280,5 N - Top drive = motor com máximo de 24,7 Nm de torque. 	Perfuradas duas amostras de rochas diferentes: giz (calcário branco) e concreto

Fonte: Autoria própria

2.8 OPORTUNIDADES EM PROJETOS RECENTES DE BANCADAS

A Figura 20 mostra em detalhes a bancada de laboratório utilizada no trabalho de Franca (2010).

Figura 20 - Exemplo de bancada de laboratório



Fonte: Adaptado de Franca (2010)

Da análise de projetos já concebidos é possível observar várias concepções de testes diferentes. Porém, nenhum dos dispositivos conseguiu até o momento replicar com exatidão o comportamento das plataformas em campo, devido, principalmente, a ausência de sistema de circulação de fluido de perfuração na maioria das bancadas avaliadas.

A seguir, são explorados os principais sistemas presentes em diferentes bancadas de laboratório ou plataformas em escala reduzida:

1/ Sistema de movimentação: o *Top Drive* de dispositivos em escala consiste no motor elétrico e no mecanismo para fornecer peso sobre a broca. O motor de corrente contínua é frequentemente utilizado por possuir a tensão de saída constante dentro do limite de corrente permitido, fornecendo assim transferência de torque suave do motor à coluna de perfuração (SRIVASTAVA; TEODORIU, 2019). Uma das dificuldades na construção de bancadas de laboratório está na transmissão de peso para a extremidade inferior da coluna de perfuração, decorrente, principalmente, da massa reduzida dos componentes das bancadas. Para não inviabilizar a perfuração das rochas, a adição de discos no eixo da coluna pode auxiliar no aumento do peso sobre a broca (KAPITANIAK et al., 2015).

As configurações de Franca (2010) e Kovalyshen et al. (2014) utilizaram servomotores nos seus experimentos, tendo como principal vantagem a precisão e o maior controle na aplicação de peso na broca. Porém, se um dos objetivos dos experimentos nestas bancadas for a medição de vibrações torcionais, o movimento gradual do servomotor não é a melhor opção, sendo recomendável usar o motor de corrente contínua.

2/ Coluna de perfuração: a redução da coluna de perfuração em escala de laboratório, bem como a escolha do material empregado na fabricação, tem grande importância no objetivo dos testes.

Se a preocupação for a determinação das características mecânicas da broca utilizada, uma coluna de perfuração de aço rígido é a escolha apropriada, principalmente pela alta resistência mecânica, replicando o material empregado em colunas de plataformas reais (FORSTER, MACFARLANE, DINNIE, 2010; ESMAEILI et al., 2012). Materiais mais flexíveis são recomendados se o objetivo for a análise

do comportamento dinâmico da coluna. Nos últimos anos, o alumínio foi o material escolhido nos projetos de colunas de perfuração em escala reduzida devido à baixa densidade em comparação ao aço. Foi possível mensurar com mais clareza os vários fenômenos de vibração, bem como os mais destrutivos, além da melhor avaliação do contato entre a coluna e a parede do poço (KHADISOV et al., 2019; WIKTORSKI et al., 2019; LOEKEN et al., 2018).

As vibrações torcionais se tornam visíveis apenas se a rigidez do modelo em escala reduzida atingir índices de rigidez comparáveis ou inferiores ao real. Assim, se objetivo é avaliar as vibrações torcionais na coluna de perfuração, o ideal é utilizar PVC rígido ou a fibra de vidro ao invés de materiais como aço ou alumínio na fabricação da coluna (MARQUEZ; TEODORIU, 2017).

3/ Sistema de circulação: o efeito do estudo da vazão do fluido é muito importante em perfurações de poços de óleo e gás. O fluido de perfuração é fundamental para manter boas taxas de penetração da broca na superfície com a limpeza dos cascalhos de rochas no fundo do poço. Além disso, o fluido é responsável pela estabilidade da parede dos poços e pela refrigeração dos cortadores da broca. O Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) da UTFPR dispõe de uma unidade experimental vertical com comprimento total de 15,5 m, que pode ser empregada na avaliação do comportamento do fluido e da pressão na região anular, reproduzindo situações encontradas em poços reais. A proposta de Tingey (2015) foi medir a influência do fluido na vibração da coluna de bancada horizontal, utilizando um sistema com drenagem, filtração e bombeamento de fluido. No projeto de bancada móvel de Smith (2017) foi adicionado tanque reserva para suprir a perda de fluido de perfuração durante o processo de filtração. Outras pesquisas utilizaram o escoamento de água ou ar comprimido, com intuito de facilitar a limpeza e penetração da broca sobre a superfície (FRANCA; 2010; KOVALISHEN et al., 2014; KAPITANIAK et al., 2015; BAVADIYA et al., 2017).

4/ Redução de escala: embora o objetivo de cada experimento seja o de reduzir o comprimento total da coluna de perfuração, a redução do diâmetro da coluna para a bancada é o fator limitante. Por exemplo, para reduzir na escala de 1:50 uma coluna de perfuração de 150 metros de comprimento e cinco polegadas de diâmetro, a

coluna da bancada teria três metros de comprimento e apenas 2,54 milímetros de diâmetro externo. Para fatores de escala mais agressivos, a redução no diâmetro da coluna de perfuração se tornaria inatingível. A pesquisa de Westermann et al. (2015) concebeu uma bancada horizontal que preserva as semelhanças geométricas, cinemáticas e dinâmicas com uma seção de coluna de perfuração com 20 metros de comprimento, 165 milímetros de diâmetro externo em uma escala de $n_L = 0,27$, para avaliar as vibrações que atuam nesse tipo de estrutura em operação. A redução de escala de Westermann et al. (2015) preservou o número de Cauchy, um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia e elásticas que atuam sobre a coluna de perfuração. Para a utilização do número de Cauchy, considera-se as duas estruturas de interesse, a bancada e a plataforma real, confeccionadas com o mesmo material. Assim, qualquer mudança nas dimensões superficiais da coluna de perfuração da plataforma requer uma mudança na mesma proporção nas dimensões superficiais da coluna da bancada.

O presente trabalho pretende viabilizar o projeto mecânico conceitual de bancada vertical que atenda a demanda dos pesquisadores do CERNN. Para isso, a bancada projetada e construída será capaz de:

- 1/ Avaliar a influência da rotação no torque e no ROP;
- 2/ Avaliar a influência da vazão do fluido de perfuração no torque e no ROP;
- 3/ Avaliar a influência do tipo de rocha no torque e no ROP;
- 4/ Avaliar a influência do tipo de broca no torque e no ROP;
- 5/ Avaliar a influência do peso sobre a broca no torque e no ROP.

Para que a bancada de laboratório consiga replicar de maneira satisfatória as plataformas reais, alguns sistemas e mecanismos são essenciais. Entre os principais, têm-se: sistema de içamento da coluna de perfuração, sistema de circulação e filtragem de fluido, sistema de rotação da coluna, além de sensores de aquisição de dados para o controle de parâmetros de perfuração e a segurança operacional da bancada. Os cálculos preliminares de esforços dos sistemas da coluna se fazem necessários para o dimensionamento dos componentes e futura fabricação da bancada. Ademais, as equações de conversão de escala possibilitam a comparação de parâmetros entre dispositivos com tamanhos diferentes.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO CONCEITUAL

A primeira etapa deste capítulo define os requisitos necessários para o desenvolvimento do projeto de bancada de laboratório, depois, busca-se gerar concepções que atendam aos requisitos determinados para o projeto. Por fim, a solução com maior potencial é escolhida para a próxima etapa de desenvolvimento.

3.1 ESCLARECIMENTO DA TAREFA

Na fase de Esclarecimento da tarefa, busca-se entender e definir as delimitações do projeto, além dos requisitos técnicos necessários para que a bancada seja capaz de desempenhar as funções que os pesquisadores do CERNN necessitam. Ou seja, o dispositivo vai avaliar a influência dos principais parâmetros de perfuração na eficiência operacional do processo. Pelo caráter científico do projeto, a necessidade do cliente não será abordada neste trabalho, nem a ferramenta de priorização QFD (*Quality Function Deployment*).

O desenvolvimento do projeto da bancada de laboratório não é algo totalmente novo, como pôde ser verificado na revisão feita na seção 2.7, onde vários projetos de dispositivos de perfuração são abordados. Para a definição dos requisitos do projeto é fundamental determinar os principais componentes da bancada e delimitar as faixas nas quais os parâmetros de perfuração serão medidos. Com a bancada construída, os principais testes experimentais de perfuração serão reproduzidos em rochas sintéticas, possivelmente de concreto, similares às rochas reais encontradas em campo.

De acordo com os projetos recentes, uma bancada de perfuração demanda os seguintes sistemas e estruturas:

Torre: é a estrutura que suporta a coluna de perfuração, e para isso ela deve ter altura e força suficientes para desempenhar a função;

Motores e bombas: fornecem energia para girar a coluna de perfuração, escoar o fluido de perfuração e movimentar axialmente a coluna, se for o caso. É necessário

determinar os esforços preliminares dos principais sistemas da bancada para a definição da capacidade dos motores e bombas que suportarão as estruturas;

Peso sobre a broca: representa a quantidade de peso aplicada à broca para perfurar. Em casos de colunas de perfuração muito leves, a broca dificilmente penetrará na estrutura somente com o seu peso;

Coluna de perfuração: é o elemento essencial na bancada. A coluna tem como função primordial a transferência de rotação à broca, além de servir de acesso para o fluido de perfuração;

Circulação: Se faz necessário uma configuração que permita a execução de testes com filtragem e recirculação do fluido de perfuração;

Broca: é o elemento responsável pelo corte. Além de quebrar as rochas, a broca atua no sistema de circulação da estrutura, pois é o mecanismo por onde o fluido de perfuração se desloca até chegar à extremidade de corte.

O Quadro 2 revela os limites máximos dos principais parâmetros de perfuração que foram executados em bancadas de laboratório na última década.

Quadro 2 - Faixas de operação de parâmetros em bancadas de perfuração

Referências	ROP (mm/s)	WOB (kN)	Torque sobre a Broca (N.m)	Velocidade de Rotação (rpm)	Vazão do Fluido (l/min)	Profundidade de Corte (mm)
Esmaeli et al. (2012)	0,095	0,80	30,00	360,00	-	300,00
Kovalyshen (2014)	-	4,00	40,00	400,00	-	2,00
Bavadiya et al. (2015)	0,127	0,16	-	275,00	15,14	355,60
Kapitaniak et al. (2015)	-	2,20	9,00	54,00	-	-
Sethambaram (2016)	-	2,97	-	190,00	-	4,00
Bavadiya et al. (2017)	-	0,22	-	900,00	11,35	-
Thenevin et al. (2017)	0,840	80,00	-	-	-	400,00
Yang et al. (2017)	1,694	2,00	211,57	30,00	-	-
Loeken et al. (2018)	0,260	0,11	8,59	1500,00	11,00	-
Kalantari, Baghbanan e Hashemalhosseini (2019)	1,100	-	-	400,00	-	50,00

Fonte: Autoria própria

A comparação entre os dados operacionais coletados no Quadro 2, além das características geométricas e dimensionais revisadas na seção 2.7 são as bases

para a geração da lista de requisitos do projeto na Tabela 1. O objetivo é que a bancada a ser construída tenha capacidade de perfurar, empregando parâmetros que contemplem a maioria das faixas de operação abordadas no Quadro 2. Os requisitos do projeto vieram, também, das demandas operacionais dos pesquisadores do CERNN, tal como o diâmetro da broca de perfuração, com aproximadamente 14 centímetros.

Na primeira coluna da Tabela 1 são apresentados duas opções de requisitos: as exigências (E), ou seja, requisitos mandatórios e impositivos para a concepção do projeto; e os desejáveis (D), sugestões importantes para serem discutidas e empreendidas, caso seja possível.

Tabela 1 - Lista de requisitos do projeto

E/D	Requisitos	Objetivo
1. Geométricos		
D	Comprimento da coluna	1500 mm
D	Diâmetro externo da coluna	40 mm
D	Diâmetro interno da coluna	30 mm
E	Diâmetro da broca	140 mm
D	Possuir poucos componentes e de fácil manutenção	
D	Realizar perfurações verticais	
2. Parâmetros operacionais		
D	WOB	≤ 2 kN
D	Torque	≤ 40 N.m
D	Velocidade de rotação da coluna	≤ 800 rpm
D	Vazão do fluido	≤ 15 l/min
D	Profundidade de corte	≤ 400 mm
D	ROP	≤ 1 mm/s
3. Utilização		
D	Coluna de perfuração rígida (atenção com a flambagem).	
D	Drenagem no chão para eventuais vazamentos.	
4. Segurança		
E	Respeito a Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12) - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.	
E	Botão de Emergência.	
D	Placa de acrílico para proteção (dos operadores e dos componentes) da lama e dos detritos decorrentes da perfuração.	

Fonte: Autoria própria

A intenção é utilizar as equações de similaridade desenvolvidas na seção 4.6 para a conversão, em escala, dos parâmetros geométricos e operacionais da Tabela 1 para casos reais em campo.

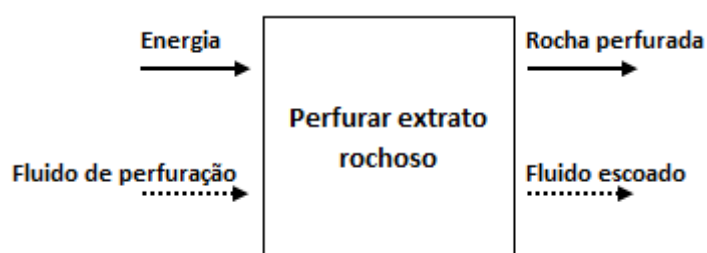
3.2 PROJETO CONCEITUAL

Nesta fase é desenvolvida, inicialmente, a análise funcional da bancada de laboratório. Em seguida, as possíveis soluções e combinações para o projeto são investigadas e, finalmente, a melhor solução é selecionada dentre todas avaliadas.

3.2.1 Função Global

Compreender a função global do produto ou dispositivo é fundamental para o desenvolvimento do projeto. A função do produto é a relação entre os seus fluxos de entradas e saídas. A função global da estrutura de perfuração pode ser observada na Figura 21, onde a entrada de energia para movimentar os equipamentos, junto com fluido de perfuração para carregar os cascalhos, produzem a perfuração desejada.

Figura 21 - Função global do processo de perfuração de rochas

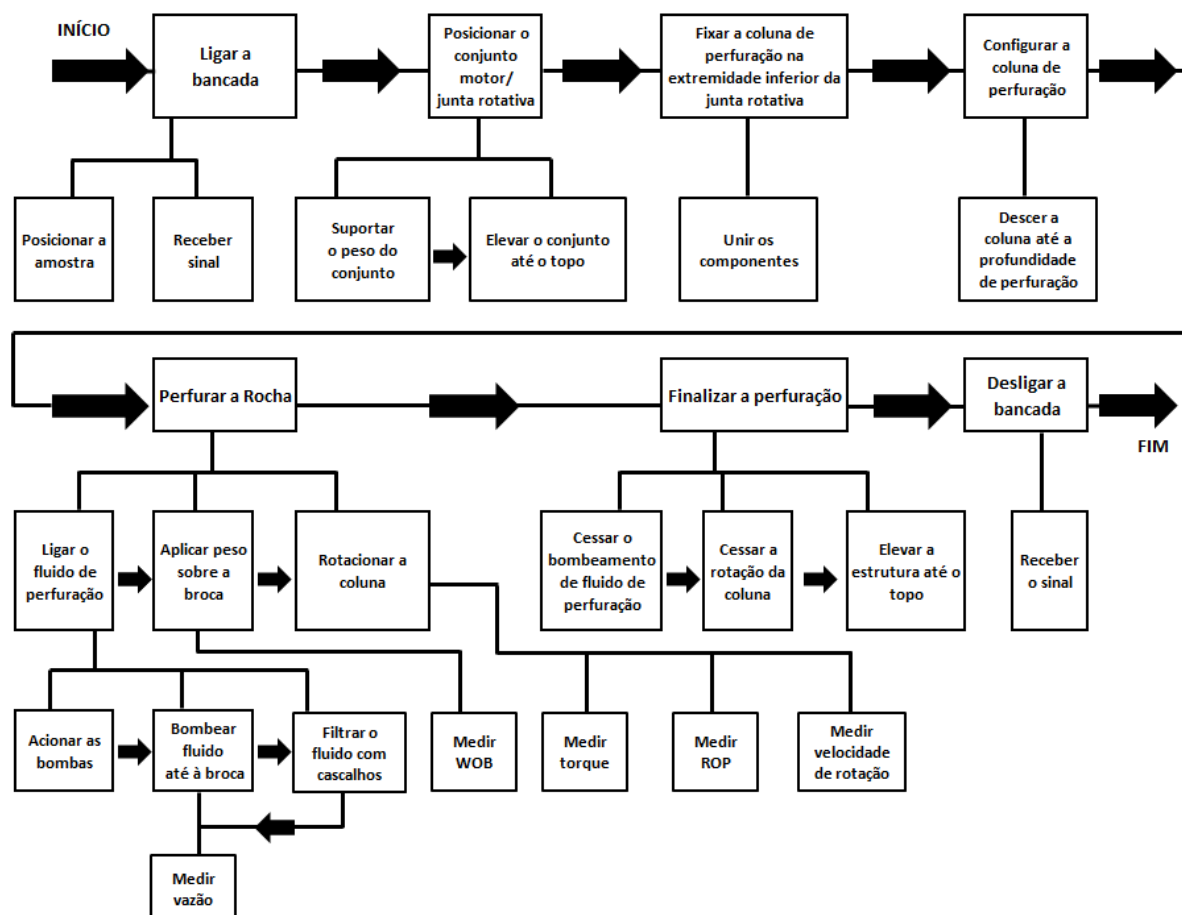


Fonte: Autoria própria

3.2.2 Estrutura Funcional

Em sistemas mais complexos, como é o caso de bancadas de perfuração de rochas, podem ocorrer dificuldades da equipe de projetistas em visualizar a solução física do projeto. Para facilitar o processo, uma das estratégias é a divisão da função global em subfunções mais simples. A decomposição da função global da Figura 21 em estruturas funcionais pode ser visualizada na Figura 22. Para que a função de finalizar a perfuração seja executada, por exemplo, são necessárias três subfunções subsequentes: cessar o bombeamento de fluido de perfuração, cessar a rotação da coluna e elevar a estrutura até o topo da bancada.

Figura 22 - Estrutura funcional






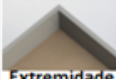








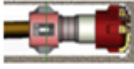
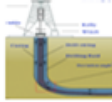









Fonte: Autoria própria

3.2.3 Matriz Morfológica

De acordo com Pahl et al. (2007), a matriz morfológica é o método sistemático de geração de soluções de projeto. Para alcançar a função global de desenvolver a bancada de laboratório para perfurar extrato rochoso é necessário gerar soluções para cada uma das subfunções abordadas na seção anterior. A matriz morfológica é mostrada no Quadro 3. O primeiro passo desse método é determinar o sequenciamento das funções e subfunções nas duas primeiras colunas da esquerda do Quadro 3. Para cada subfunção é necessário definir opções de solução para que num processo posterior seja definida a melhor solução possível de acordo com os requisitos do projeto proposto.








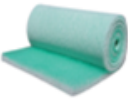
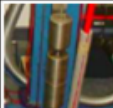








Quadro 3 – Matriz morfológica

(continua)

Funções	Subfunções	Sequência	Soluções				
			A	B	C	D	E
Ligar a bancada	Posicionar a amostra	1	 Mandril	 Suporte fixo	 Braçadeira	 Extremidade do suporte	
	Formato da amostra	2	 Cúbico	 Cilíndrico			
	Receber sinal	3	 Interruptor	 Botão eletrônico	 Controle remoto		
Posicionar o conjunto motor/junta rotativa	Perfil da torre da bancada	4	 Triangular	 Retangular			
	Coluna ou suporte da amostra se movimentam ?	5	Coluna se movimentam	Suporte da amostra se movimentam			
	Disposição da coluna de perfuração	6	 Vertical	 Horizontal	 Direcional		
	Fornecer energia para elevar o conjunto até o topo	7	Motor de corrente contínua	Servomotor	Motor de passo	 Manual	 Macaco elétrico
	Mecanismo para o sistema de elevação	8	 Cabos	 Cremalheira	 Fuso de esferas		
Fixar a coluna de perfuração no motor	Unir os componentes	9	 Rosqueamento	 Flange			
Configurar a coluna	Descer a coluna até a profundidade de perfuração	10	Motor de corrente contínua	Servomotor	Motor de passo	 Manual	 Sistema pneumático

Quadro 3 – Matriz morfológica

(conclusão)

Funções	Subfunções	Sequência	Soluções				
			A	B	C	D	E
Perfurar a rocha	Acionar bombas	11	 Interruptor	 Botão eletrônico	 Controle remoto		
	Bombar o fluido até a broca	12	 Bomba volumétrica	 Bomba centrífuga			
	Tratar o fluido com cascalho	13	 Filtro de metal	 Filtro em PVC	 Manta filtrante		
	Disposição do filtro	14	Vertical	Horizontal			
	Aplicar peso sobre a broca	15	Motor de corrente contínua	Servomotor	Motor de passo	 Pesos/Anilhas	Utilizar peso dos próprios componentes da bancada
	Rotacionar a coluna	16	Motor de corrente contínua	Servomotor	Motor de passo		
Finalizar a perfuração	Cessar o fluido de perfuração e a rotação	17	 Interruptor	 Botão eletrônico	 Controle remoto		
	Elevar o motor até o topo	18	Motor de corrente contínua	Servomotor	Motor de passo	 Manual	 Macaco elétrico
Desligar a bancada	Receber sinal	19	 Interruptor	 Botão eletrônico	 Controle remoto		

Fonte: Autoria própria

As soluções para cada subfunção do Quadro 3 são discutidas a seguir:

- 1/ Para fixar a amostra de concreto / rocha no volume determinado são escolhidas quatro possibilidades: mandril, suporte fixo, braçadeira e utilização da extremidade do suporte. Nessa subfunção são esperadas que as amostras sejam fabricadas com dimensões pré-definidas e que não fiquem soltas no espaço determinado;
- 2/ São duas as opções para o formato da amostra de perfuração, são elas: cúbica ou cilíndrica;
- 3/ Para receber o sinal para ligar a bancada são apresentadas três soluções: interruptor, botão eletrônico (Liga/Desliga) e controle remoto. O objetivo é que o processo seja simples e acessível para qualquer operador. É importante salientar que o ambiente de perfuração é sujo e úmido, podendo ser inviável a utilização de estruturas muito sensíveis ao pó, a lama ou a oxidação;
- 4/ Para a torre de suporte da bancada, o ideal é que a estrutura tenha montagem simples, barata, e robusta o suficiente para suportar as solicitações inerentes aos dispositivos de perfuração. Para essa subfunção são disponibilizados dois perfis: triangular e retangular;
- 5/ Duas possibilidades são discutidas para o comportamento da coluna. Na primeira solução, a coluna se movimenta e a amostra fica estática, situação semelhante ao das plataformas em campo. Na outra opção, a amostra se movimenta na direção da coluna, que por sua vez não se move axialmente;
- 6/ Os projetos estudados utilizaram duas soluções principais para a disposição da coluna de perfuração, são elas: verticais e horizontais. A opção com a disposição direcional é comum em colunas de plataformas reais;
- 7/ O fornecimento de energia para a elevação da coluna de perfuração pode ser realizada por cinco modos diferentes: motor de corrente contínua, servomotor, motor de passo, manual ou macaco elétrico. Esta subfunção é de extrema relevância para o processo de controle dos parâmetros de perfuração, além de suporte para altas solicitações mecânicas. Por isso, a tendência é de utilização de componentes automatizados e com grande capacidade de posição para a correta leitura de dados de avanço da broca sobre a amostra;
- 8/ São três as opções para o mecanismo do sistema de elevação da bancada, são eles: cabos, cremalheira ou fuso de esferas;
- 9/ Duas soluções são disponibilizadas para conectar a coluna na estrutura de perfuração, são elas: o rosqueamento ou a conexão por flange;

10/ O processo de descida da coluna de perfuração até a amostra é similar aos itens 7 e 8. A diferença é a adição do sistema pneumático no lugar do macaco elétrico;

11/ O acionamento da bomba para conduzir fluido para a extremidade da broca, apresenta três opções semelhantes àquelas que foram utilizadas no item 3: Interruptor, botão eletrônico (Liga/Desliga) e controle remoto. Além das características já citadas no item 3, é desejável que se tenha disponível o botão de Emergência no controle da bomba para eventuais problemas de vazamento de fluido;

12/ Para bombeamento do fluido são disponibilizadas duas soluções: bomba volumétrica e bomba centrífuga. É fundamental a escolha de dispositivo que tenha capacidade de bombear o fluido com cascalhos, mas que não seja oneroso ao projeto;

13/ O ciclo do fluido de perfuração é planejado para ser fechado. Ou seja, o fluido, junto com os cascalhos de rochas, deverá ser filtrado para o reinício do ciclo de circulação. Para solucionar o problema são apresentadas três opções de filtros: filtro de metal, filtro em PVC e manta filtrante. É importante salientar que será utilizado, possivelmente, amostras de concreto para o testes de perfuração, ou seja, o dispositivo de filtragem deverá suportar altos impactos, além de não entupir facilmente;

14/ São duas as opções para a disposição do filtro: horizontal ou vertical;

15/ A aplicação do peso sobre a broca é o parâmetro que controla o avanço da broca na superfície de perfuração. Diferente da aplicação do peso sobre a broca em operações em campo, no qual o peso próprio da coluna de perfuração incide na região de perfuração. No caso da coluna de bancada, devido à massa reduzida da estrutura, é necessária a ação de uma força externa para que se consiga penetrar na superfície de corte. As opções apresentadas para esta subfunção são: motor de corrente contínua, servomotor, motor de passo, pesos ou a utilização do peso próprio dos componentes da bancada;

16/ Para rotacionar a coluna são disponibilizados as seguintes opções: motor de corrente contínua, servomotor e motor de passo;

17/ Têm-se três opções para cessar o fluido de perfuração e a rotação da coluna: Interruptor, botão eletrônico (Liga/Desliga) e controle remoto. É importante que a escolha de ligar e desligar o dispositivo seja realizada pelo mesmo mecanismo;

18/ Para a simplificação do projeto, a subfunção de elevar a estrutura de perfuração até o topo pode ser a mesma solução escolhida no item 7 e 8;

19/ O desligamento da bancada após o fim do ciclo de perfuração pode ter a mesma solução da função de ligar (3).

3.2.4 Geração das Concepções

Na análise do Quadro 4 são consideradas as principais sequências do Quadro 3 para a geração de oito concepções distintas no *Solidworks*. Para a Concepção 4, por exemplo, o perfil escolhido para a torre de suporte é o retangular, a coluna vertical se movimenta em direção à amostra, o sistema pneumático é responsável pela movimentação axial da coluna, além da aplicação de peso sobre a broca, e o servomotor é o mecanismo utilizado para girar a coluna de perfuração.

Quadro 4 – Geração de concepções

Sequência	Concepção 1	Concepção 2	Concepção 3	Concepção 4	Concepção 5	Concepção 6	Concepção 7	Concepção 8
4	A	B	A	B	A	B	B	B
5	A	A	A	A	A	B	A	B
6	A	A	A	A	A	A	A	B
7	D	C	-	-	A	E	B	-
10	D	C	E	E	A	-	B	E
15	D	E	-	-	D	-	B	-
16	A	B	A	B	B	A	A	A
18	D	C	-	-	A	E	B	-

Fonte: Autoria própria

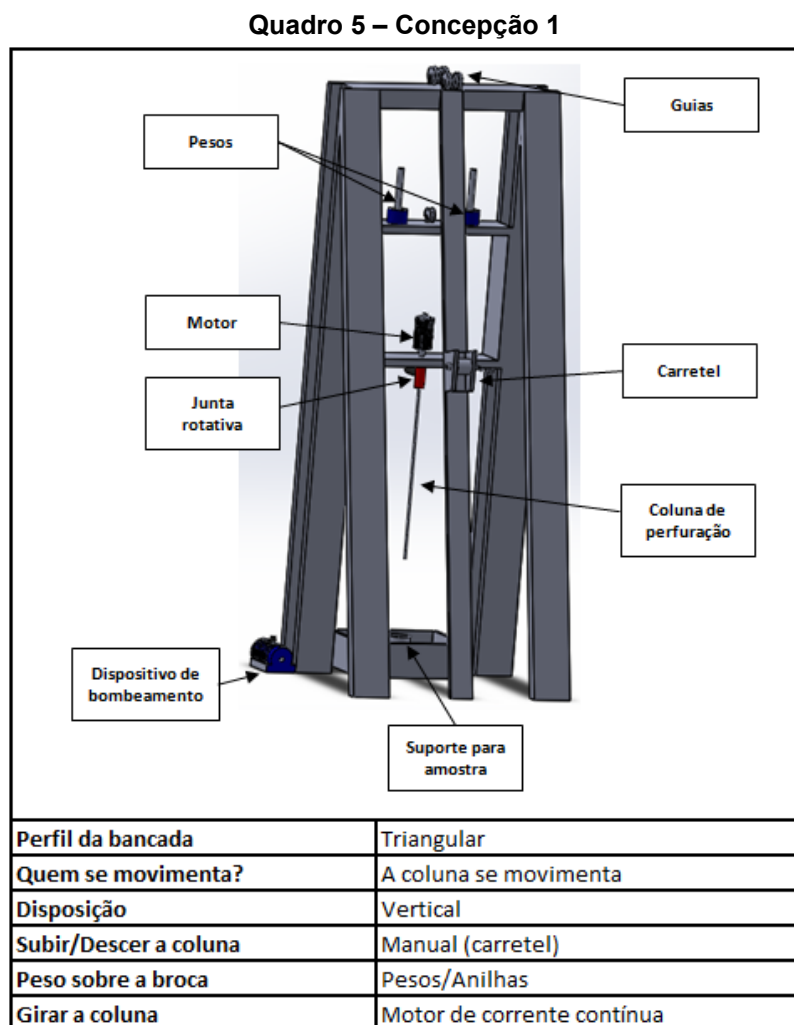
Se espera um alto grau de automatização da bancada, mas devido à robustez do sistema, perfurando rochas em meio à lama, o pó, os cascalhos e a possível oxidação de estruturas metálicas, a melhor solução para o controle de acionamento e desligamento da estrutura e de seus componentes é o interruptor, estrategicamente posicionado próximo ao Botão de Emergência, prevenindo possíveis acidentes em operação. Além disso, o rosqueamento é a solução mais simples para unir, por exemplo, a coluna da bancada à broca de perfuração. As definições sobre as melhores soluções relativas às sequências 1, 2, 12, 13 e 14 do Quadro 3, que abordam o sistema de circulação da bancada, são determinadas na

seção 4.4. A sequência 8, que é relativa ao mecanismo de elevação da bancada é definida na seção 4.2, que trata do sistema de içamento da estrutura.

A escolha de oito concepções é devido ao fato de que são capazes de mapear a maioria das bancadas avaliadas no referencial teórico.

Concepção 1

O Quadro 5 apresenta a Concepção 1. A solução é menos automatizada que as outras concepções. Os pesos são colocados na bancada de acordo com a demanda necessária para os testes. A subida da coluna de perfuração é executada de forma manual por meio do carretel.

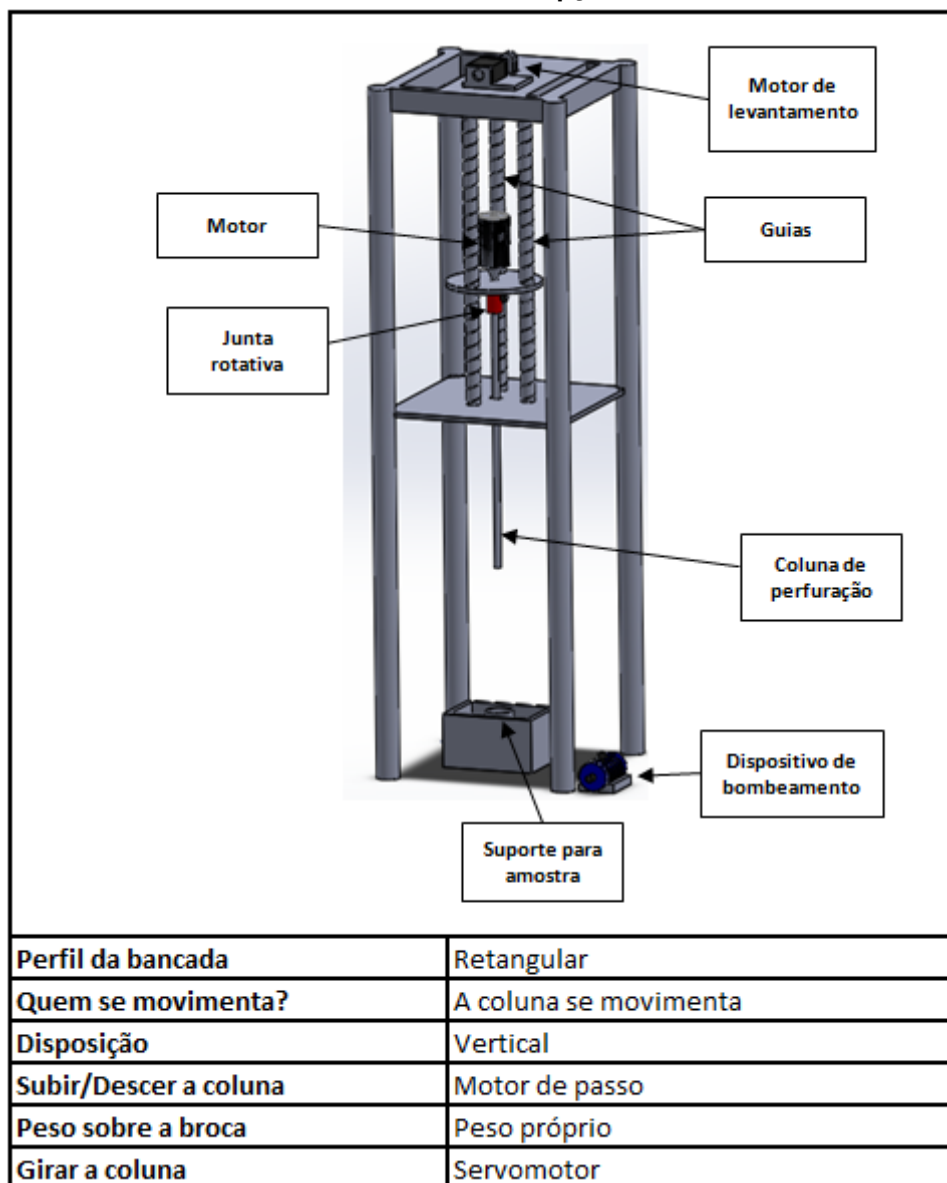


Fonte: Autoria própria

Concepção 2

O Quadro 6 apresenta a Concepção 2. A solução tem três guias e uma placa de alojamento para o motor, que gira a coluna de perfuração, fornecendo mais estabilidade à bancada. O posicionamento vertical é realizado por um motor de passo no topo, essa solução não contempla um peso externo sobre a broca. Neste caso, o peso é o próprio da estrutura de guias, motor e coluna.

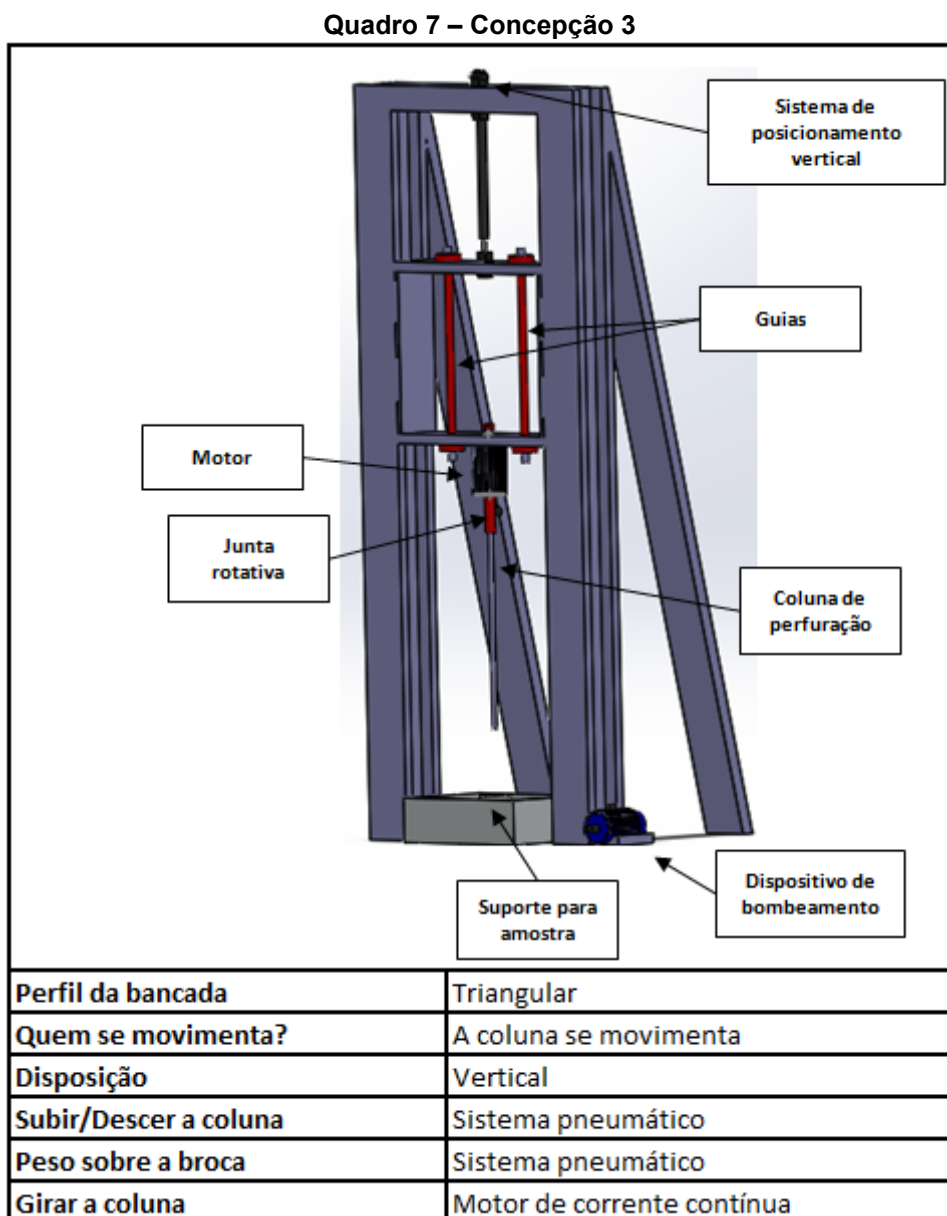
Quadro 6 – Concepção 2



Fonte: Autoria própria

Concepção 3

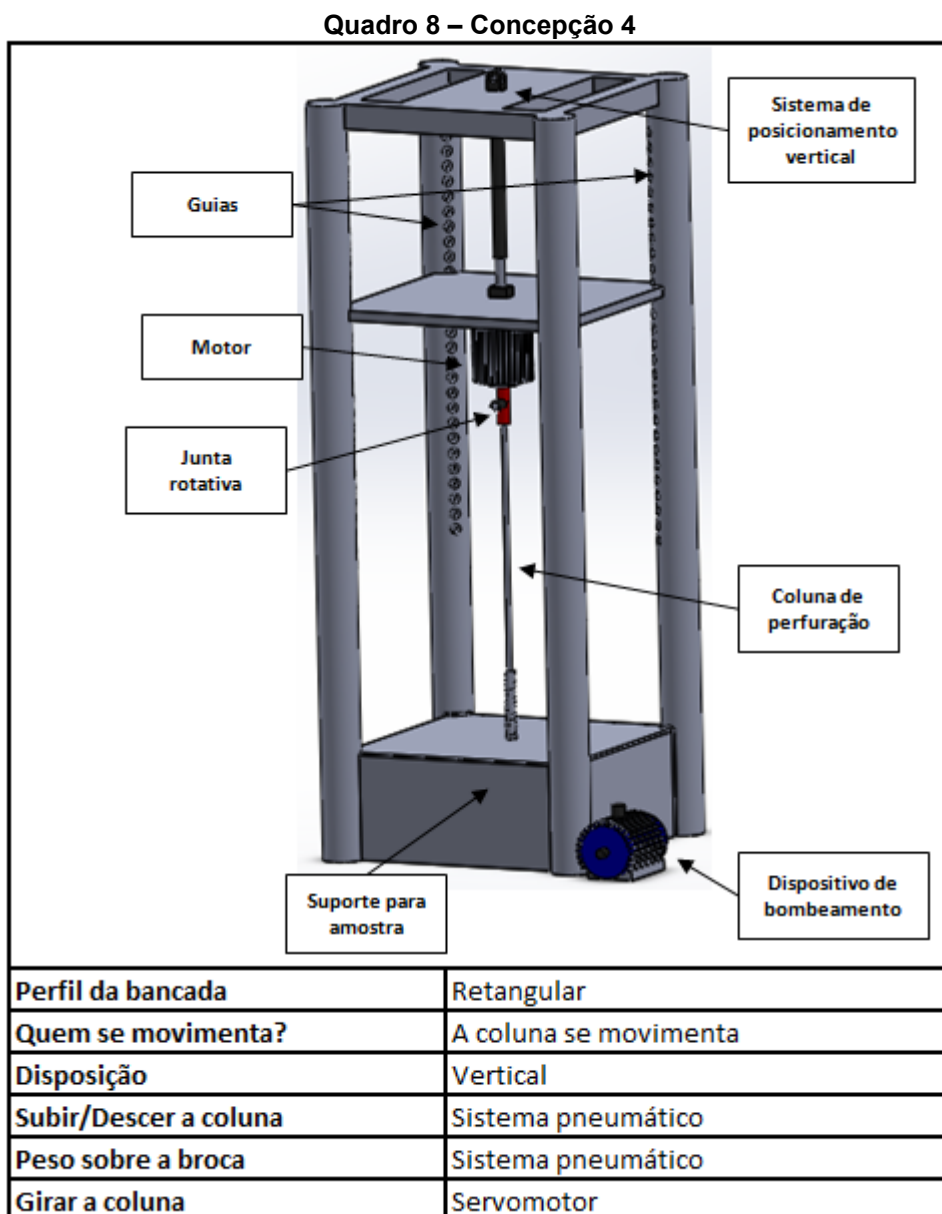
O Quadro 7 apresenta a Concepção 3. A solução é compacta e possui um sistema pneumático para içamento, que também fornece peso sobre a broca para auxiliar na penetração da ferramenta sobre a região de corte.



Fonte: Autoria própria

Concepção 4

O Quadro 8 apresenta a Concepção 4. A solução também utiliza o sistema pneumático para içamento e para provimento de peso sobre a broca. Uma placa com quatro extremidades desliza sobre os guias das quatro colunas da bancada.

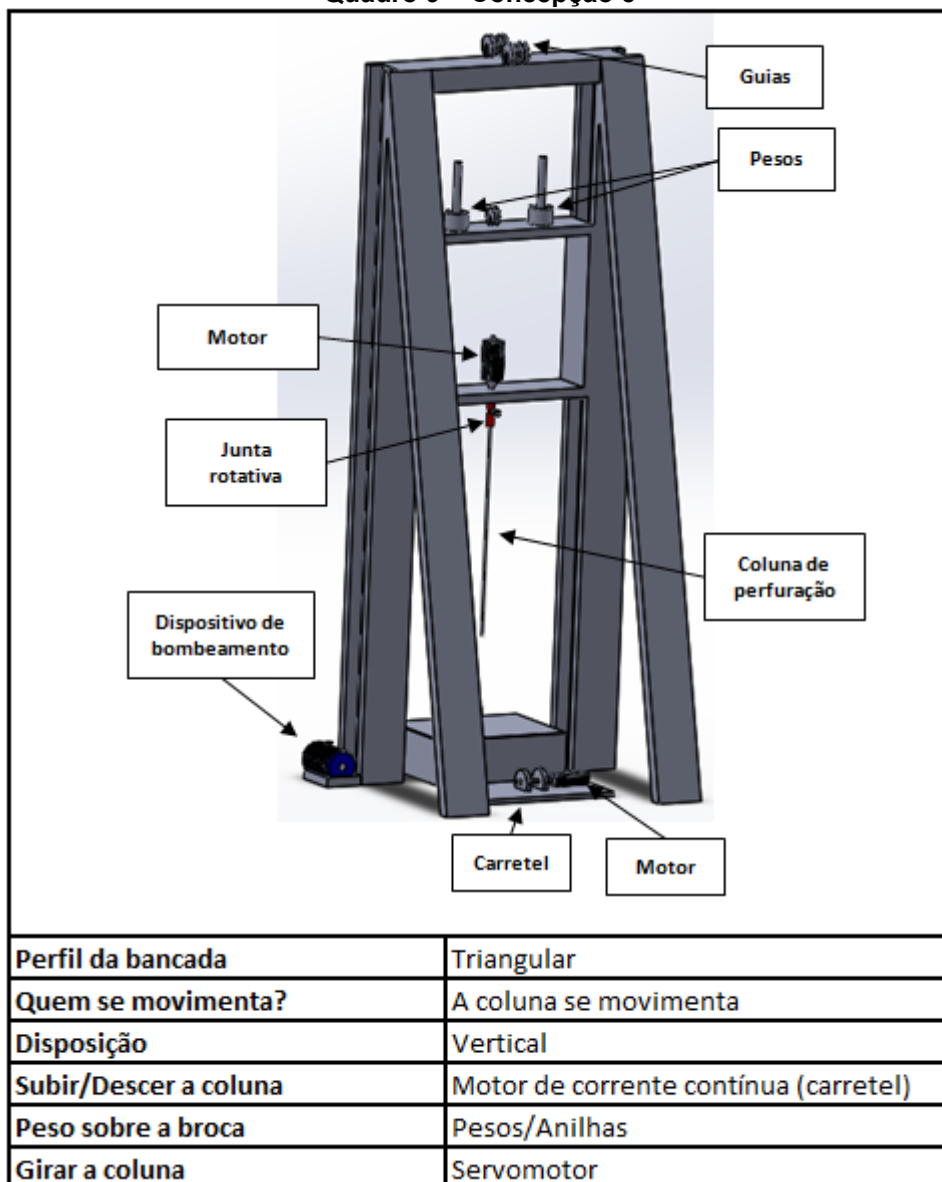


Fonte: Autoria própria

Concepção 5

O Quadro 9 apresenta a Concepção 5. A solução é similar à Concepção 1, porém com a inclusão de uma estrutura automatizada por um motor de corrente contínua que gira o carretel para o içamento da coluna de perfuração.

Quadro 9 – Concepção 5

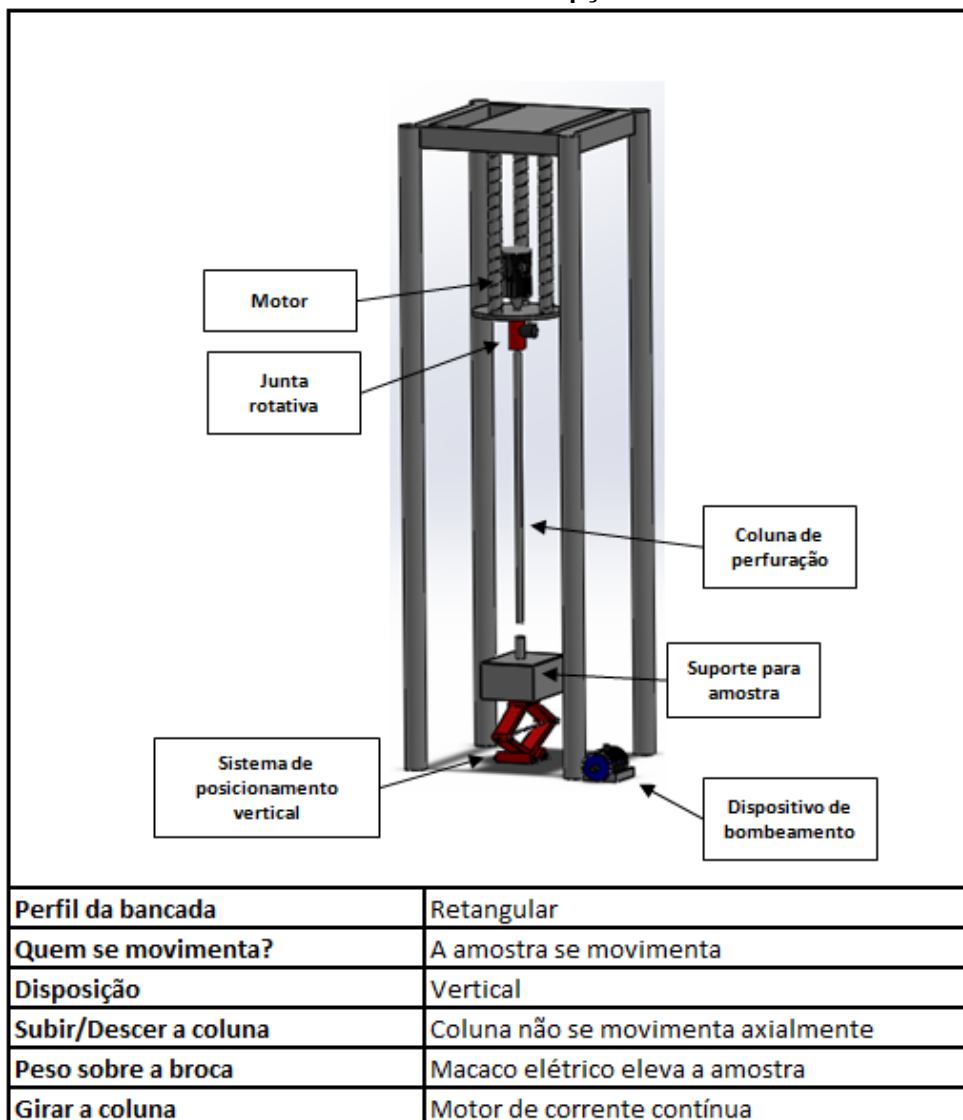


Fonte: Autoria própria

Concepção 6

O Quadro 10 apresenta a Concepção 6. Nessa solução, a amostra é içada pelo macaco elétrico em direção à coluna de perfuração. Ou seja, na Concepção 6 a coluna não se movimenta axialmente.

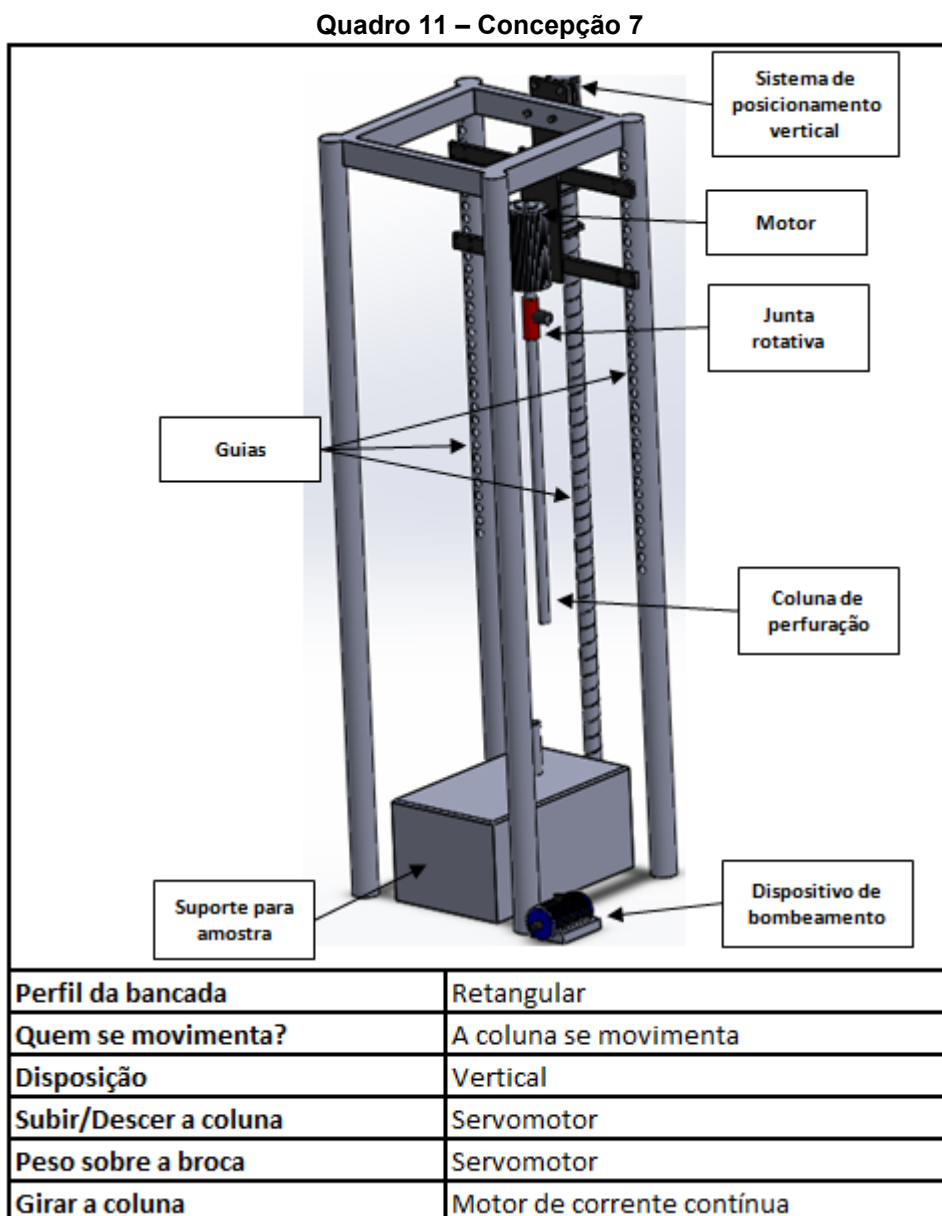
Quadro 10 – Concepção 6



Fonte: Autoria própria

Concepção 7

O Quadro 11 apresenta a Concepção 7. Nessa solução, a coluna de perfuração é acoplada na base de uma coluna independente, que é responsável pelo içamento e pelo peso sobre a broca.

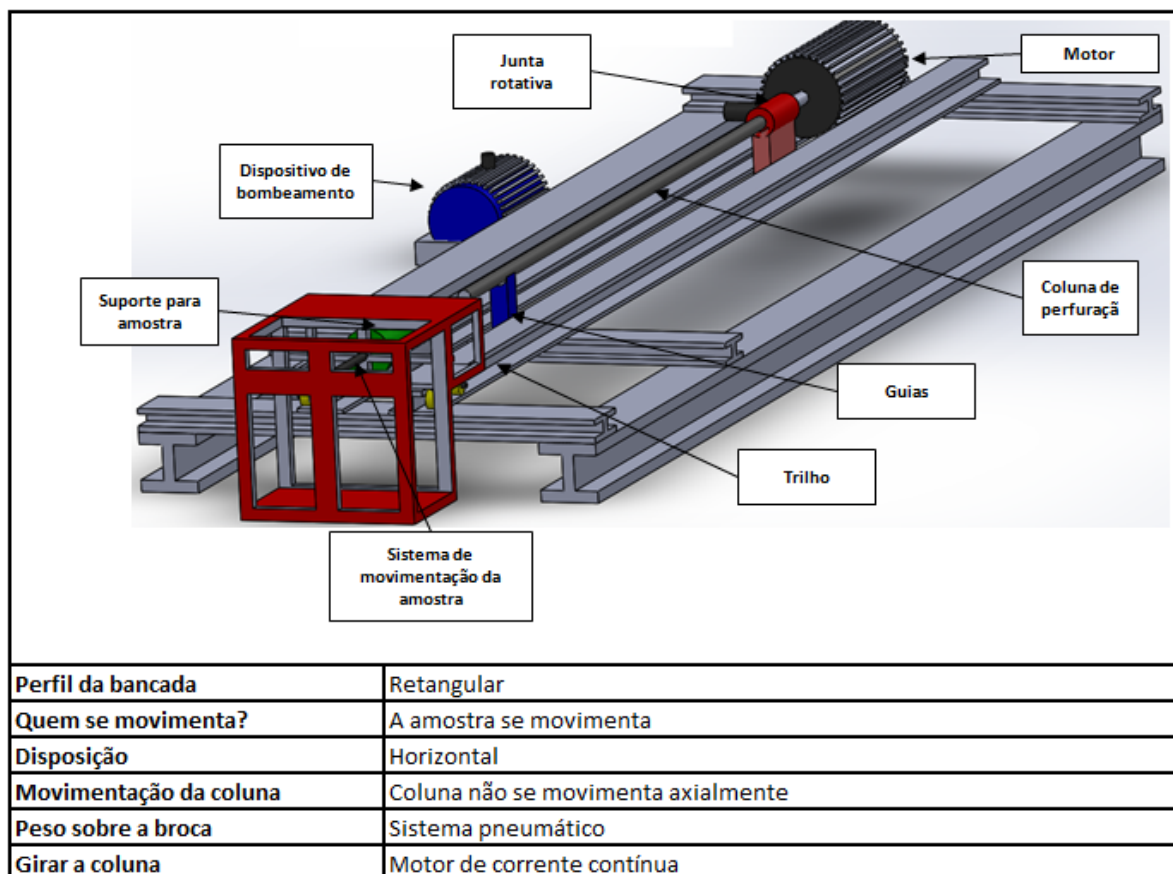


Fonte: Autoria própria

Concepção 8

O Quadro 12 apresenta a Concepção 8. A solução é horizontal e o sistema pneumático guia a amostra até a coluna de perfuração que, por sua vez, não se movimenta axialmente.

Quadro 12 – Concepção 8



Fonte: Autoria própria

3.2.5 Seleção da Solução

O passo seguinte é a escolha da concepção de maior potencial dentre as oito geradas, que reúna características que possibilitem a realização das funções e requisitos definidos na Tabela 1 de forma mais efetiva. Para a escolha da função com maior potencial, empregou-se a matriz de avaliação relativa do Quadro 13 (OLANDOSKI; VIDAL, 2011). Para tal, a concepção 3 foi escolhida como referência, sendo comparada com as outras sete concepções em nove critérios de avaliação derivados da lista de requisitos do projeto. Caso a solução escolhida seja superior a

concepção de referência no critério avaliado, então recebe o sinal positivo (+), caso contrário, o sinal negativo (-), e se a solução for similar, o sinal de igualdade (=). A coluna Tendência elenca o que se espera de cada critério, por exemplo, no caso do critério de tempo de ciclo, espera-se menor tempo para a agilidade do processo. Já no contexto do controle de WOB, espera-se o maior monitoramento possível para a correta medição dos dados. Após a avaliação, é efetuada a somatória de cada coluna. Assim, a concepção com maior pontuação é escolhida para o próximo passo de desenvolvimento do projeto.

Na avaliação do critério de controle de velocidade de rotação, os servomotores são mais capacitados que os motores de corrente contínua, principalmente, para girar a coluna em altas rotações. No critério de controle de WOB, as concepções equipadas com servomotores alcançam mais precisão que o sistema pneumático que, por sua vez, é mais confiável que a utilização de pesos na coluna, embora os sistemas manuais possuam mais simplicidade de manutenção. O sistema pneumático, apesar de não ter o controle de posição tão apurado quanto o servomotor, tem o custo mais atraente, ainda que o sistema pneumático possua maior número de mecanismos, o que aumenta a possibilidade de falhas nos seus principais componentes, como: válvulas, bombas e tubulações. O macaco elétrico tem a capacidade de controle do peso aplicado à broca intermediário entre o sistema pneumático e os sistemas manuais.

As concepções que necessitam de adição de pesos, ou mesmo de operações manuais de subida e descida da coluna, tiveram pontuações menores no critério de segurança, já que o objetivo é o menor contato possível do operador com o dispositivo para evitar acidentes. Essas concepções também necessitam de mais tempo de ciclo de perfuração. Porém, devido ao baixo grau de automatização, o tempo de treinamento do operador tende a ser menor que as outras soluções. A avaliação do macaco elétrico no critério de segurança é negativa em comparação com as outras opções, principalmente, devido ao maior risco de tombamento em operação. De acordo com pesquisadores do CERNN, o treinamento é um elemento fundamental para a segurança dos operadores, além de reduzir a quantidade de falhas decorrentes do manuseio inadequado de bancadas experimentais.

No critério de quantidade de componentes, avalia-se o número de componentes do sistema de içamento e do sistema de rotação da bancada, que são

os principais sistemas do projeto. Portanto, as concepções com sistemas pneumáticos têm o maior número de componentes, superando a quantidade de componentes das concepções que necessitam de adição de pesos que, por sua vez, possuem mais componentes que as soluções que empregam motores ou macacos elétricos.

No critério de disposição da bancada, as concepções verticais e com a coluna se movimentando axialmente se mostram mais vantajosas, pois essa disposição pode experimentar o mesmo comportamento de plataformas reais quando descem para perfurar, principalmente relacionado às vibrações que incidem sobre a coluna.

Os custos de fabricação das bancadas não são abordados nesta análise, pelo fato que a decisão sobre o material não será tomada nesta etapa do projeto, mesmo que o emprego do aço seja mais indicado, graças à alta resistência mecânica desse material e o preço inferior ao do alumínio.

Após a avaliação, a concepção 7 foi escolhida como a de maior potencial, conforme o Quadro 13.

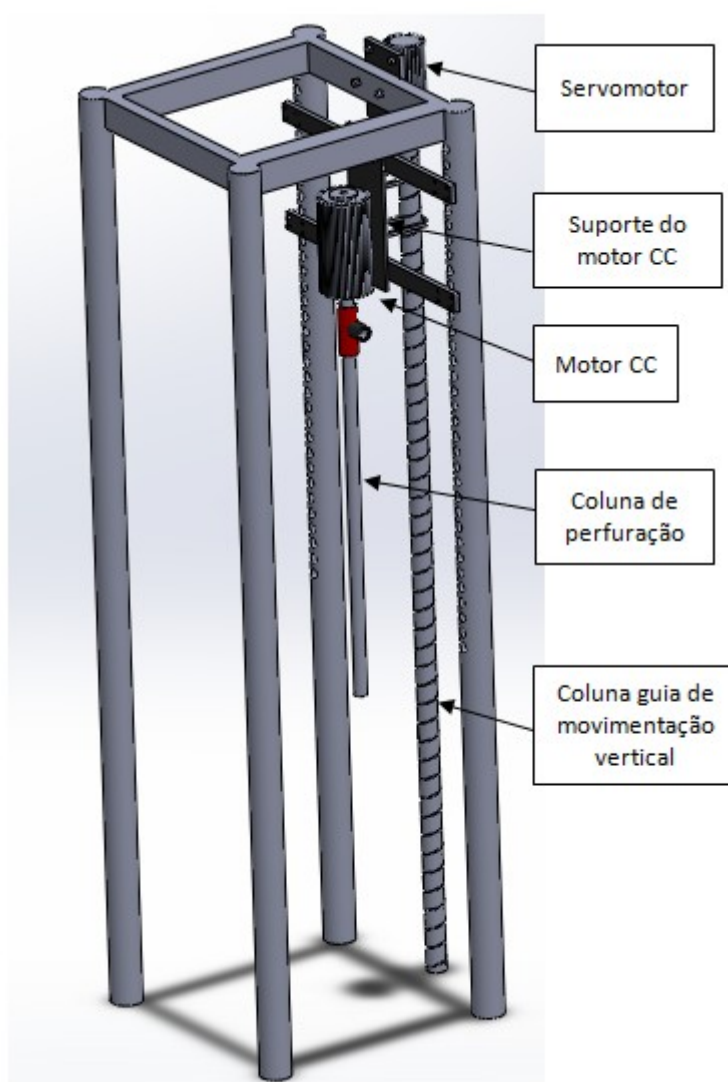
Quadro 13 - Matriz de avaliação relativa

Critérios de Avaliação	Unidade	Tendência	Concepções							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Controle de velocidade de rotação	rpm	↑	=	+	REFERÊNCIA	+	+	=	=	=
Controle de WOB	N	↑	-	-		=	-	-	+	=
Disposição da bancada	-	-	=	=		=	=	-	=	-
Simplicidade de manutenção	-	↑	+	=		=	=	=	=	=
Grau de automatização	%	↑	-	-		=	-	=	=	=
Quantidade de componentes	un.	↓	+	+		=	+	+	+	=
Segurança	-	↑	-	=		=	-	-	=	=
Tempo de ciclo	s	↓	-	-		=	-	=	=	=
Tempo de treinamento	s	↓	+	=		=	=	=	=	=
Somatória			-1	-1	0	1	-2	-2	2	-1
Classificação			4º	4º	3º	2º	5º	5º	1º	4º

Fonte: Autoria própria

3.3 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO SELECIONADA

A Figura 23 mostra o leiaute conceitual da concepção 7, escolhida como a de maior potencial entre as outras sete concepções avaliadas na seção 3.2.

Figura 23 - Concepção da bancada selecionada

Fonte: Autoria própria

A concepção 7 tem um alto grau de automatização e menor contato do operador com a bancada, com o emprego de servomotor e de motor de corrente contínua para prover energia para a movimentação vertical e rotacional da coluna de perfuração, respectivamente. Além disso, o baixo número de componentes desses dispositivos facilita os processos de manutenção preventiva e corretiva.

O suporte do motor de corrente contínua permite uma interface posterior com o servomotor, fornecendo mais estabilidade na transferência de torque para a movimentação vertical da coluna de perfuração através da coluna guia.

A concepção vertical selecionada permite uma melhor avaliação da influência das variações do peso aplicado à broca e da velocidade de rotação da coluna de perfuração no torque e na taxa de penetração da broca, pois simula o movimento axial experimentado pela maioria das plataformas em campo.

O próximo capítulo determina os esforços preliminares nos principais sistemas da concepção 7, o sistema de circulação da bancada, os sensores para aquisição de dados, além de definição das equações de conversão de escala entre dispositivos de perfuração com tamanhos diferentes.

4 PRÉ-PROJETO PRELIMINAR

Concluída a fase de geração e escolha da concepção com maior potencial, inicia-se o refinamento da solução. A primeira etapa da fase preliminar define os propagadores de restrição. Em seguida, ocorre o detalhamento dos principais sistemas da bancada de laboratório e dos seus componentes, bem como os critérios dimensionais envolvidos no projeto.

4.1 PROPAGADORES DE RESTRIÇÃO

Os propagadores de restrição são elementos sobre os quais o projetista não tem controle. Vários componentes da bancada são padronizados e suas características geométricas e operacionais não podem ser alteradas (BAXTER, 2000). Por exemplo, o torque do motor de corrente contínua é definido pelo fabricante, ou seja, a escolha do mecanismo depende da disponibilidade de mercado. O Quadro 14 apresenta os principais propagadores de restrição na bancada de laboratório.

Quadro 14 - Propagadores de restrição

Conjunto	Propagadores de Restrição Relacionados
Local de instalação	- Altura do pé-direito - Material do piso - Temperatura do ambiente
Sistema de içamento	- Dimensões dos componentes do mecanismo de movimentação vertical - Características operacionais e geométricas do servomotor
Sistema de rotação da coluna	- Características operacionais e geométricas do motor de corrente contínua
Sistema de circulação de fluido	- Características operacionais e geométricas do dispositivo de bombeamento - Filtro

Fonte: Autoria própria

Nas seções a seguir, os principais conjuntos de sistemas da bancada são detalhados e dimensionados.

4.2 SISTEMA DE IÇAMENTO

A concepção 7 se sobressai, principalmente, pelo sistema de içamento, em uma coluna independente, controlado por um servomotor, no qual a coluna de perfuração é acoplada e se movimenta por meio de trilho-guia. O controle de movimentação de subida e descida da coluna de perfuração necessita de uma estrutura com boa estabilidade e resistência mecânica. O mecanismo na matriz morfológica, do Quadro 3, que satisfaz as principais demandas do sistema de içamento da coluna é o fuso de esferas combinado com guias lineares.

Os fusos de esferas são sistemas de transmissão mecânica que transformam, com alta precisão, movimento rotacional em linear. Os guias lineares são sistemas de movimentação de baixo atrito, por onde a estrutura que suporta a coluna de perfuração é capaz de deslizar com estabilidade (HIWIN, 2018). A Figura 24 apresenta os dois dispositivos empregados na solução.

Figura 24 - Componentes do sistema de içamento



Fonte: BestEquip (2021)

4.2.1 Dimensionamento do Servomotor

A Equação 10 determina o torque mínimo necessário para suportar e movimentar a estrutura que compreende o sistema de içamento da coluna de perfuração (EGELAND et al., 2017):

$$T = \frac{Fp}{2\pi\epsilon_f} \quad (10)$$

Sendo:

F = força atuando no fuso de esferas (N);

p = passo do fuso de esferas (m);

ϵ_f = fator de eficiência do fuso.

Para efeito de cálculo, considera-se o WOB de 2000 N, definido nos requisitos do projeto, como sendo o máximo de peso que o servomotor vai suportar, incluindo o peso da coluna de perfuração com o comprimento de 1,5 m, do motor de rotação da coluna e do suporte da bancada. Escolhendo um modelo de fuso de esferas com passo de 5 mm e eficiência de 90%, tem-se o torque mínimo de 1,77 Nm (BUDYNAS; NISBETT, 2011). A estimativa é que o curso de movimentação da coluna de perfuração seja de 1 m, e que o tempo necessário para que ela se movimente da extremidade superior até a inferior seja de 15 s (EGELAND et al., 2017). Assim, chega-se ao número de 200 rotações, ou seja, 800 rpm.

A Equação 11 determina a potência mínima necessária para que o servomotor, com eficiência de 90%, consiga sustentar o sistema de içamento da bancada (EGELAND et al., 2017):

$$P_s = \frac{2\pi n_f T}{60\epsilon} \quad (11)$$

Sendo:

T = torque mínimo no fuso (Nm);

n_f = velocidade de rotação no fuso (rpm);

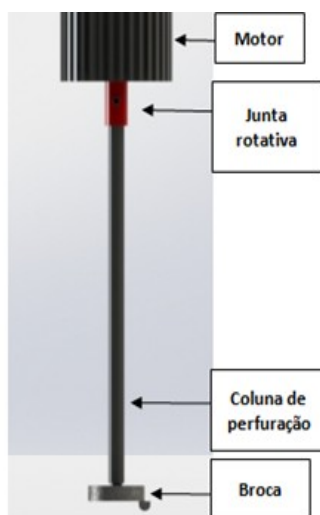
ϵ = eficiência do servomotor.

Os cálculos demonstram que a potência mínima necessária para o servomotor do sistema de içamento seja de 165 Watts ou 0,22 cv.

4.3 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DA COLUNA

Na Figura 25 é possível visualizar o sistema de movimentação da coluna de perfuração da bancada de laboratório.

Figura 25 – Esquema com o sistema de movimentação da coluna

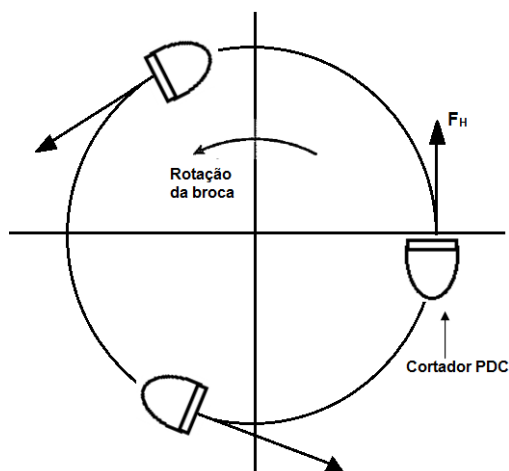


Fonte: Autoria própria

A concepção 7 utiliza o motor de corrente contínua para fornecer rotação à coluna de perfuração. A junta rotativa é por onde ocorre a entrada do fluido de perfuração que escoar até a extremidade inferior da coluna, por meio da broca.

A Figura 26 apresenta a vista superior do cortador da broca PDC rotacionando sobre a superfície de perfuração.

Figura 26 - Vista superior de cortador PDC



Fonte: Adaptação de Hareland et al. (2009)

4.3.1 Cálculo Preliminar da Taxa de Penetração da Broca

O modelo para previsão de taxa de penetração em brocas PDC de Hareland e Rampersad (1994), discutido na subseção 2.6.2, pode ser aplicado no desenvolvimento da bancada de laboratório para o dimensionamento dos esforços preliminares de projeto. A Equação 12 determina a taxa de penetração do modelo de Hareland e Rampersad (1994):

$$ROP = \frac{14,14NCnA_v}{d} \quad (12)$$

Primeiramente, se faz necessário o cálculo da área comprimida de rocha na frente do cortador (A_v) e da profundidade de corte (P). Para tal, empregou-se cortador PDC com diâmetro de 10 mm fixado na extremidade da broca de diâmetro de 140 mm. Para o cálculo preliminar, utilizou-se os dados máximos dos requisitos do projeto, ou seja, WOB de 2000 N e velocidade de rotação da coluna de 800 rpm. Considerou-se a perfuração de amostra em concreto SLWC50 com UCS de 50 MPa, material com resistência à compressão similar ao arenito duro, ângulo de saída lateral nulo do cortador e ângulo de ataque de 10° (HAQUE; AL-KHAIAT; KAYALI, 2004; BAVADIYA et al., 2017). As Equações 13 e 14 calculam a área comprimida de rocha na frente do cortador e a profundidade de corte, respectivamente:

$$A_v = \cos\beta \operatorname{sen}\alpha \left[\left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2P}{\cos\alpha d_c} \right) - \left(\frac{Pd_c}{\cos\alpha} - \frac{P^2}{\cos\alpha^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Pd_c}{2\cos\alpha} \right) \right] \quad (13)$$

$$P = \frac{2WOB}{\pi\sigma_p d_c} \quad (14)$$

Os cálculos apresentam valores aproximados de uma área comprimida de 4,24 mm² e uma profundidade de corte de 2,54 mm.

A ROP máxima calculada para a situação descrita acima é de 13,5 pés/h ou 1,14 mm/s.

4.3.2 Análise de Flambagem da Coluna de Perfuração

A aplicação de peso excessivo sobre a coluna de perfuração produz o fenômeno indesejável de flambagem. A flambagem é a deflexão lateral que a coluna experimenta quando submetida a carregamentos nas extremidades, situação comum em perfuração de rochas. Os carregamentos comprimem a coluna até o ponto de carga crítica. Qualquer carga superior à carga crítica acarreta falha na estrutura. A coluna da bancada precisa ter resistência suficiente para suportar o WOB máximo definido nos requisitos do projeto, sem falhar. A Equação 15 determina a máxima força que a coluna pode suportar (GOODNO; GERE, 2018):

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (15)$$

Sendo:

E = módulo de elasticidade do material da coluna (Pa);

L = comprimento da coluna (m);

I = momento de inércia da área (m⁴);

K = fator de comprimento efetivo.

A Equação 16 permite determinar o momento de inércia da área da coluna (BUDYNAS; NISBETT, 2011):

$$I = \frac{\pi(d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{64} \quad (16)$$

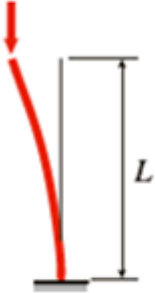
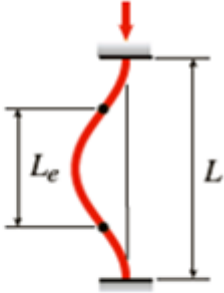
Sendo:

d_{ext} = diâmetro externo da coluna (m);

d_{int} = diâmetro interno da coluna (m);

O fator de comprimento efetivo da coluna depende da fixação da extremidade da estrutura. A Figura 27 apresenta dois exemplos comuns em engenharia.

Figura 27 - Fator de comprimento efetivo

Extremidade engastada-livre	Extremidades engastadas
$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$
	
$L_e = 2L$	$L_e = 0,5L$
$K = 2$	$K = 0,5$

Fonte: Adaptado de Goodno e Gere (2018)

No primeiro exemplo, a extremidade inferior da coluna está engastada, enquanto a extremidade superior encontra-se livre, nesse caso $K = 2$. Na segunda situação, as duas extremidades estão engastadas, para esse caso $K = 0,5$.

Para o dimensionamento preliminar de flambagem, na coluna de perfuração, foi considerado o aço AISI 1080 temperado e revenido com módulo de elasticidade de 200 GPa (MATWEB, 2021). Assumindo os valores de 0,03 m e 0,04 m para o diâmetro interno e externo da coluna de perfuração, respectivamente, a força crítica máxima que a estrutura pode suportar é de aproximadamente 18,84 kN, considerando a situação mais crítica de projeto, para $K = 2$. O valor encontrado é bem superior ao WOB máximo de 2 kN, definido na lista de requisitos do projeto. Ou seja, a coluna tem uma boa segurança.

4.3.3 Dimensionamento do Motor de Corrente Contínua

Para a escolha do motor de movimentação da coluna de perfuração, é fundamental a determinação do torque requerido para que a broca consiga girar sobre a superfície. Ademais, o motor necessita de energia para superar a inércia da estrutura que compreende a massa da broca e dos componentes da coluna de perfuração.

O modelo de Rajabov et al. (2012), discutido na subseção 2.6.1, fornece informações sobre os esforços que um cortador de broca PDC é submetido no processo de perfuração de rochas. Considera-se a força normal sobre o cortador com valor de 2000 N (WOB), a velocidade de rotação da coluna de 800 rpm e o coeficiente de atrito entre o cortador e a amostra em concreto de 0,43 (RAOUS; ALI KARRAY, 2009). A Equação 17 determina a força horizontal atuando no cortador:

$$F_H = F_N \cos\beta \frac{(1 - \mu \operatorname{tg}\alpha)}{(\mu + \operatorname{tg}\alpha)} \quad (17)$$

Com os dados conhecidos aplicados na Equação 17, chega-se ao valor de $F_H = 3048$ N, e o torque na broca de 213,4 Nm, com o cortador localizado na extremidade da broca de 140 mm, conforme a Figura 26.

A Equação 18 define a potência mínima requerida para um motor de corrente contínua operar com 90% de eficiência (ϵ) na máxima velocidade de rotação do projeto de 800 rpm, convertida para rad/s (EGELAND et al., 2017):

$$P_{cc} = \frac{\omega T_c}{\epsilon} \quad (18)$$

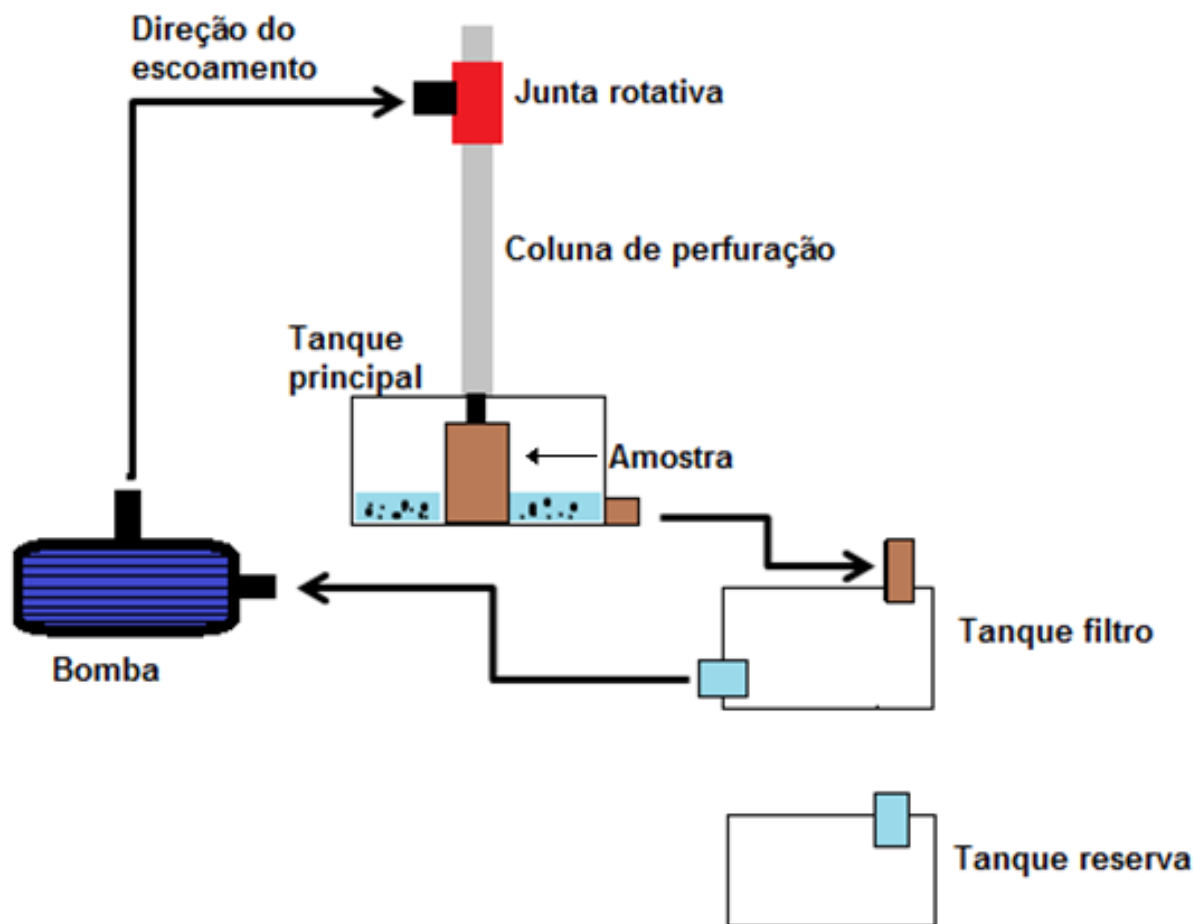
A potência mínima calculada para rotacionar e cortar a amostra é de 19,86 kW, ou 27 cv.

4.4 SISTEMA DE CIRCULAÇÃO

O sistema de circulação completo não é comum em bancadas de laboratório, principalmente, devido a dificuldade de filtragem, além dos desafios de se manter o escoamento de fluido inundando a região de perfuração. O esquema da Figura 28 apresenta uma proposta para o sistema de circulação da bancada da concepção 7. Esse sistema compreende uma bomba, que fornece energia para que o fluido se desloque, neste caso a água. A água é inserida, por meio da junta rotativa, no interior da coluna e desloca-se até a extremidade da broca. Após a perfuração, a mistura de água e cascalhos, no tanque principal, é direcionada por uma tubulação até o tanque filtro. No tanque filtro, a mistura é filtrada e a vazão é

medida de forma contínua. Caso seja necessário mais água, o tanque reserva estará disponível para fornecimento de água limpa. Logo, o ciclo de circulação está pronto para o reinício.

Figura 28 - Sistema de circulação da bancada de laboratório



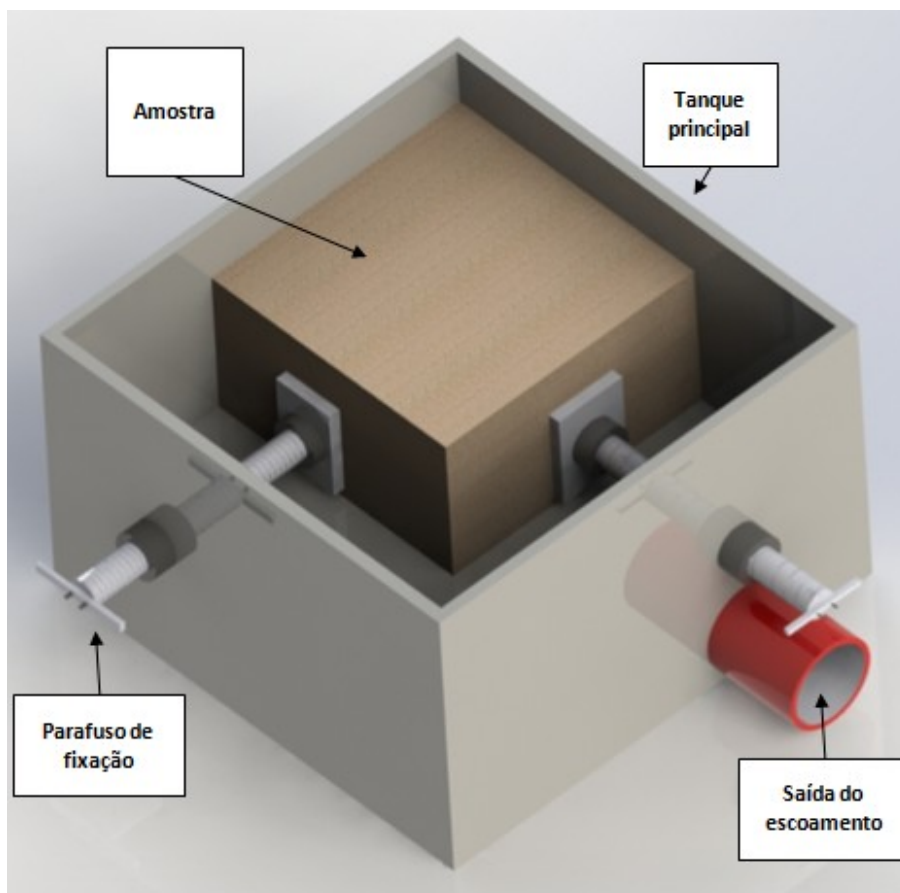
Fonte: Autoria própria

As soluções das principais subfunções relativas ao sistema de circulação da bancada são mostradas no Quadro 3 da matriz morfológica. As escolhas das soluções para a concepção desse sistema são definidas nos próximos parágrafos.

A Figura 29 mostra os detalhes do tanque principal. A solução para o posicionamento da amostra utilizando o formato cúbico, ao invés do cilíndrico, se mostra mais interessante devido à possibilidade de fixação da amostra nas extremidades do tanque, aumentando a estabilidade na perfuração e reduzindo a necessidade de outras peças de fixação. Nesse caso, é importante se atentar a disponibilidade de espaço para que a estrutura de perfuração não colida com o tanque durante os experimentos.

A mistura de água e cascalhos, decorrentes da perfuração, se move para o tanque filtro, por meio da tubulação de saída do escoamento.

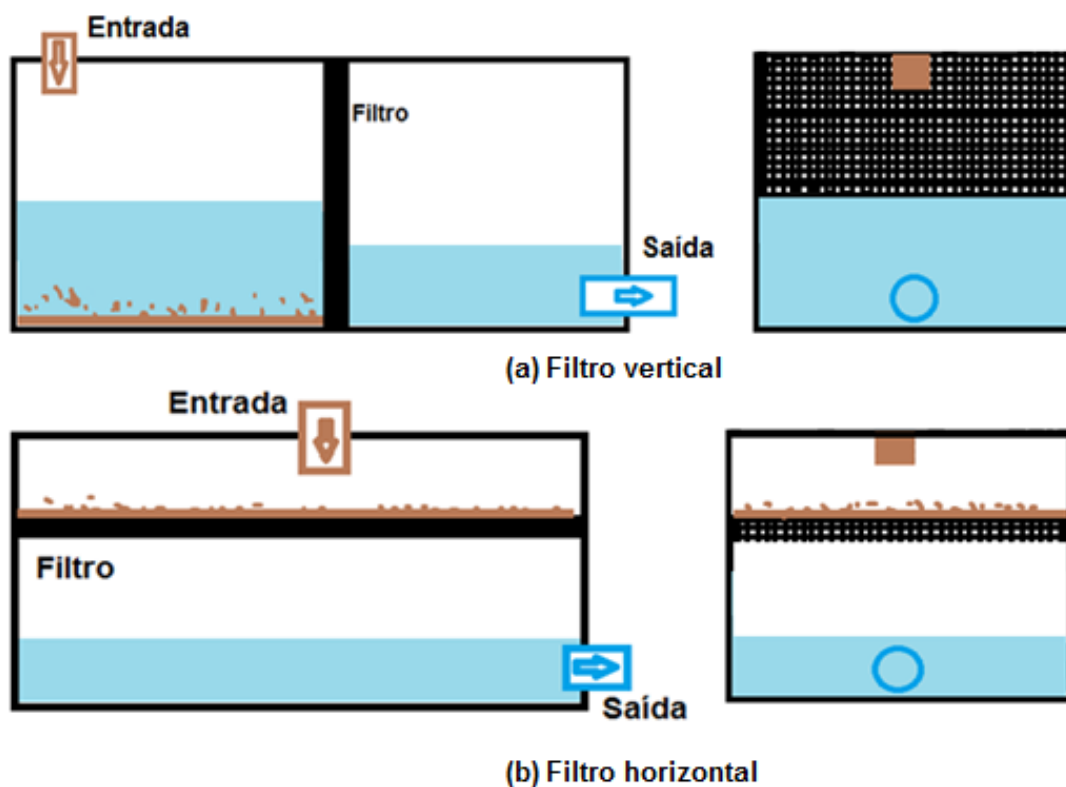
Figura 29 - Tanque principal



Fonte: Autoria própria

Duas opções de filtragem no tanque filtro foram definidas no Quadro 3 da matriz morfológica e podem ser visualizadas na Figura 30. A primeira opção utiliza o filtro vertical, enquanto a segunda opção emprega o filtro horizontal. A solução (a) se mostra menos competitiva que a solução (b), devido à maior possibilidade de obstrução do sistema de filtragem, em razão da concentração de cascalhos na parte inferior do filtro vertical durante o processo contínuo de perfuração. Além disto, se faz necessário a utilização de filtro de metal na solução escolhida, em vez de filtro em PVC ou manta filtrante, devido às condições críticas de filtragem de água misturada com detritos de concreto.

Figura 30 - Vista lateral e frontal dos tanques filtro

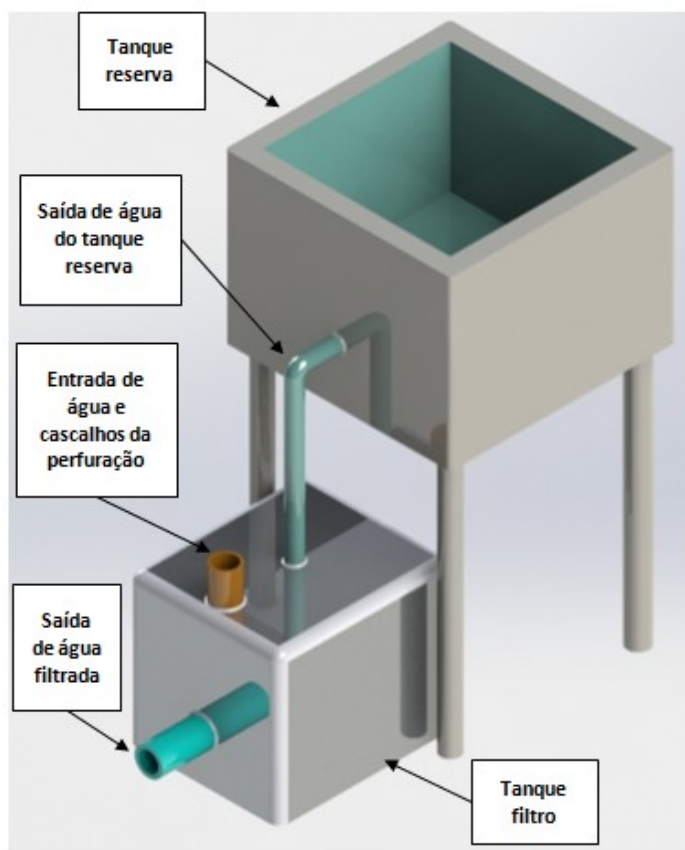


Fonte: Autoria própria

Para manter a mesma vazão de água circulando no sistema, a utilização de um tanque reserva é essencial. Para tal, um sensor de nível é instalado no interior do tanque filtro, com a função de alertar o sistema do momento em que nível estiver inferior ao necessário para a conservação do escoamento.

Para reduzir o gasto energético no transporte de água entre os tanques, o projeto preliminar contempla o tanque reserva posicionado em um nível superior ao tanque filtro. Assim, constatado o problema de insuficiência de água no ciclo, a válvula do tanque reserva é aberta para completar o volume do fluido até a posição satisfatória. A Figura 31 apresenta o tanque reserva, o tanque filtro e as conexões entre eles. No esquema relatado na Figura 31 é necessária a utilização de sensor de nível. Na seção 4.5 discute-se sobre os sensores e as suas respectivas posições para a correta aquisição de dados na bancada de laboratório.

Figura 31 - Tanque filtro e tanque reserva



Fonte: Autoria própria

4.4.1 Dimensionamento da Bomba

Para o dimensionamento da bomba, que fornece energia para o sistema de circulação, são estabelecidas algumas considerações para efeito de cálculo. A água é o fluido de perfuração, devido à facilidade de acesso ao fluido e o seu baixo custo de aquisição. O concreto leve SLWC50 é o material da amostra. A Tabela 2 mostra os dados utilizados nos cálculos:

Tabela 2 - Dados utilizados no dimensionamento da bomba

Parâmetros	Valor
Densidade da água	998 kg/m ³
Viscosidade absoluta da água	0,001 Pa.s
Densidade do concreto	1800 kg/m ³
Diâmetro médio do cascalho	0,7 mm

Fonte: Adaptado de Haque, Al - Khaiat e Kayali (2004) e Egeland et al. (2017)

A Equação 19 apresenta a expressão matemática para o número adimensional de Reynolds, parâmetro que define a transição entre o regime laminar e o turbulento no escoamento interno de tubos (FOX; MCDONALD, 2001):

$$Re = \frac{\rho V d_{int}}{\mu_{\text{água}}} \quad (19)$$

Sendo:

ρ = densidade do fluido de perfuração (kg/m³);

V = velocidade média do escoamento do fluido (m/s);

d_{int} = diâmetro interno da tubo/coluna de perfuração (m);

$\mu_{\text{água}}$ = viscosidade dinâmica da água (Pa.s).

O escoamento laminar escoar de forma estável, com aspecto de lâmina. À medida que a vazão aumenta, o fluido passa a ter um comportamento instável e aleatório, também conhecido como escoamento turbulento. Sob condições normais, a transição entre os dois tipos de escoamento ocorre em $Re = 2300$, aproximadamente (FOX; MCDONALD, 2001).

Para definição da eficiência na limpeza é necessário conhecer a velocidade na região anular, de acordo com a Equação 20. Para a eficiência do processo de limpeza da região anular, espera-se que a razão de transporte seja de 50% ou mais (BOURGOYNE JR et al., 1991; BILGESU et al., 2017):

$$R_t = 1 - \frac{v_{sl}}{v_f} \quad (20)$$

Sendo:

v_{sl} = velocidade de sedimentação do cascalho (m/s);

v_f = velocidade do fluido no espaço anular (m/s).

A definição da velocidade de sedimentação do cascalho é determinada pela Equação 21 (GUO; LIU, 2011):

$$v_{sl} = 2,97 \sqrt{\frac{d_s}{f} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)} \quad (21)$$

Sendo:

d_s = diâmetro médio do cascalho (m);

ρ_s = densidade da amostra (kg/m³);

ρ = densidade do fluido de perfuração (kg/m³);

f = fator de atrito entre a parede interna da coluna de perfuração e o fluido.

Na Equação 21, o fator de atrito do fluido com a parede interna da coluna de perfuração pode ser definido pela relação empírica entre o número de Reynolds e a rugosidade interna da coluna, decorrente das imperfeições superficiais do processo de fabricação. Uma primeira simplificação, utilizando a lei de Stokes, é estabelecida para o cálculo da velocidade de sedimentação do cascalho, como mostra a Equação 22. Nesse caso, supõe-se que o contato entre o fluido e os cascalhos seja suave, sem turbulência (BOURGOYNE JR et al., 1991).

$$v_{sl} = \frac{138(\rho_s - \rho)d_s^2}{\mu_{\text{água}}} \quad (22)$$

A velocidade de sedimentação na Equação 22 é calculada em pés/s, ou seja, todos os parâmetros de cálculo desta equação devem ser convertidos para o sistema imperial de medição. As densidades são convertidas para lbm/gal (libra-massa/galão americano), o diâmetro do cascalho e a viscosidade do fluido são transformados em polegadas e *centipoise* (cP), respectivamente. Desta maneira, a primeira estimativa para a velocidade de sedimentação das partículas do cascalho é de 0,7 pés/s, ou 0,214 m/s. Assim, o número de Reynolds calculado na Equação 19 é de 6402, considerando a velocidade de sedimentação do cascalho como sendo a velocidade média do escoamento do fluido (EGELAND et al., 2017).

O diagrama de Moody é o gráfico que fornece o coeficiente de atrito em escoamentos, com os valores conhecidos de número de Reynolds, rugosidade interna e diâmetro interno da coluna de perfuração. Assumindo o valor de rugosidade de $e = 0,9$ mm, para situações frequentes de choques de cascalhos não

filtrados com a parede interna da coluna de aço, tem-se a relação e/d_{int} de 0,03. Com esses dados, o fator de atrito encontrado no diagrama de Moody é de 0,061 (WHITE, 2011).

Aplicando os valores conhecidos na Equação 21, chega-se à velocidade de sedimentação de 0,283 m/s e número de Reynolds de 8494. Empregando mais uma vez o novo valor de Re e a relação e/d_{int} no diagrama de Moody, chega-se ao valor de $f = 0,06$. Aplicando os resultados novamente na Equação 21, chega-se à velocidade de sedimentação final de 0,286 m/s (WHITE, 2011).

Para uma eficiência de 50% no transporte de cascalhos, a velocidade na região anular requerida é de 0,572 m/s, de acordo com a Equação 20. A vazão mínima necessária para a bomba transportar os cascalhos é calculada pela Equação 23 (EGELAND et al., 2017):

$$Q = v_f A_n \quad (23)$$

Sendo:

Q = vazão da bomba (m^3/s);

A_n = área da secção anular (m^2).

A área aproximada do anular compreende a região entre o diâmetro externo da coluna e o diâmetro do poço, nesse caso representado pelo diâmetro da broca. A vazão mínima para bomba é de 0,008 m^3/s , ou 483 l/min. O valor mínimo de vazão da bomba é superior à grandeza definida no requisito de projeto, que é de 15 l/min. Para a aplicação proposta de bombeamento de líquido de baixa viscosidade, como a água, uma bomba centrífuga se apresenta como a solução mais indicada em comparação com a bomba volumétrica, que é a outra opção disponibilizada na matriz morfológica do Quadro 3 (MACINTYRE, 1997).

4.5 SENSORES PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Os sensores são dispositivos que fornecem informações essenciais para a medição e o monitoramento contínuo dos parâmetros de perfuração (LAIK, 2018). A calibração dos sensores, além da instalação adequada, é importante para que o

sistema proporcione leituras precisas (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1984). O projeto conceitual da bancada contempla os seguintes sensores:

1/ Velocidade de rotação e torque dos motores: os dados de velocidade de rotação e torque são fornecidos diretamente pelo motor de corrente contínua e pelo servomotor;

2/ Célula de carga: a célula de carga é um transdutor utilizado para medir o WOB aplicado na broca. O dispositivo é instalado na parte inferior do tanque principal e funciona como balança;

3/ Transdutores de pressão: os transdutores de pressão são dispositivos que convertem pressão em um sinal elétrico analógico. Dois transdutores são utilizados na bancada, sendo um na entrada e outro na saída da bomba para o monitoramento da variação da pressão no componente;

4/ Medidor de vazão: o medidor de vazão é instalado entre a bomba e a junta rotativa. O dispositivo é utilizado para medir a vazão de fluido que é bombeado para a região de perfuração;

5/ Sensor de deslocamento: o sensor de deslocamento é o dispositivo que mede o deslocamento vertical da coluna de perfuração, fornecendo informações sobre a taxa de penetração da estrutura. O sensor é instalado na barra superior de apoio da coluna;

6/ Acelerômetro: o acelerômetro é utilizado para determinar os níveis de vibrações na coluna de perfuração. O dispositivo é instalado na parte inferior da base onde o motor de corrente contínua é fixado;

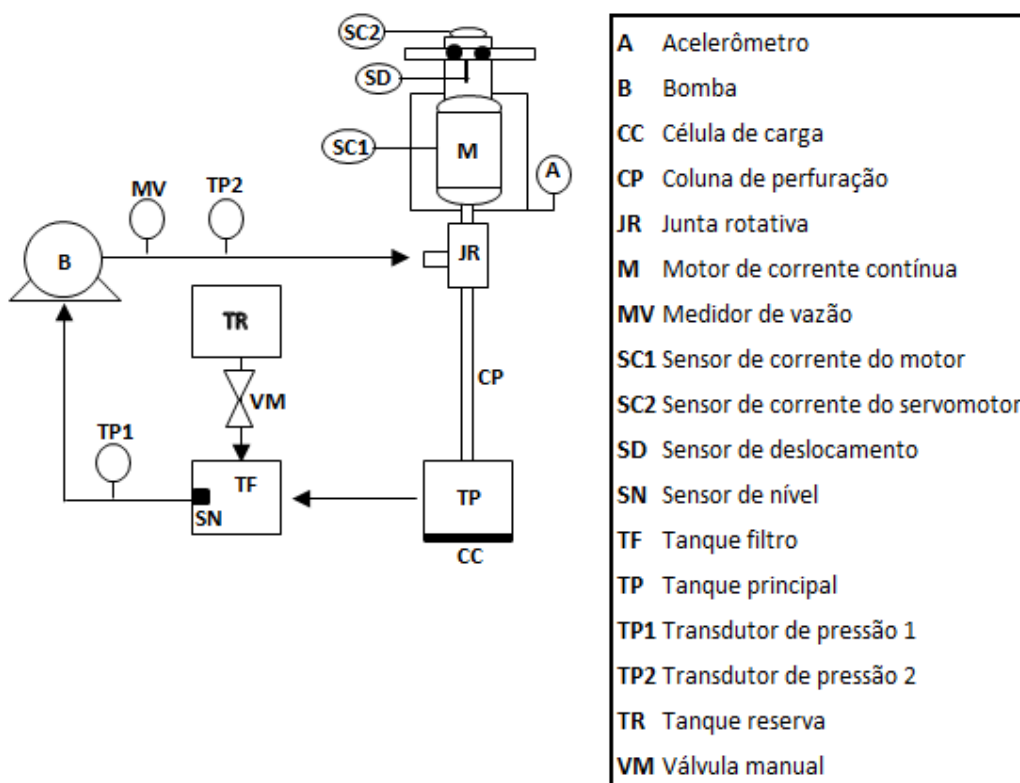
7/ Sensor de corrente: o sensor de corrente mede a corrente que entra no servomotor e no motor de corrente contínua, propiciando a definição da potência em cada componente. Os dispositivos são instalados na carcaça dos motores;

8/ Nível do tanque reserva: o sensor de nível do tanque mede o nível de fluido de perfuração no tanque filtro. Caso o nível de fluido esteja abaixo do necessário, o tanque reserva é acionado para completar a água do sistema;

9/ Válvula manual: a válvula manual libera água para o tanque filtro. O dispositivo é conectado no tanque reserva.

A Figura 32 mostra o diagrama com os principais sensores da bancada.

Figura 32 - Sensores da bancada de laboratório



Fonte: Autoria própria

4.6 EQUAÇÕES PARA CONVERSÃO DE ESCALA

A similaridade completa entre plataformas reais, com centenas de toneladas de aço e submetidas a altas solicitações mecânicas, e a bancada de laboratório é inatingível. Para a determinação de similaridade aproximada, se faz necessário considerar os parâmetros mais significativos para análise, além de simplificações necessárias para facilitar o processo de redução de escala. Uma simplificação útil é

a redução somente de seções da coluna, ao invés de toda a extensão da estrutura de perfuração (WESTERMANN et al., 2015).

O projeto de Westermann et al. (2015) propõe um dispositivo em escala que preserva o número de Cauchy, que é um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia e elásticas que atuam em colunas de perfuração de plataformas. O número de Cauchy é definido pela Equação 24, onde v é velocidade, E é o módulo de elasticidade e ρ é a densidade do material empregado na estrutura.

$$Ca = \frac{\rho v^2}{E} \quad (24)$$

Considera-se que as tensões são constantes na bancada e na plataforma real. A tensão é o produto do módulo de elasticidade do material pela deformação verificada, ou seja, $\sigma = E\varepsilon = constante$. A Equação 25 apresenta a relação entre a tensão na bancada e na plataforma, onde o subscrito B denota a bancada e o P a plataforma real.

$$n_\sigma = \frac{\sigma_B}{\sigma_P} = \frac{\varepsilon_B E_B}{\varepsilon_P E_P} = 1 \quad (25)$$

Para a utilização do mesmo material nos componentes da plataforma real e da bancada, o módulo de elasticidade não varia, ou $n_E = \frac{E_B}{E_P} = 1$. Assim, obtém-se o parâmetro de deformação na Equação 26, que é a relação da variação da deformação (ΔL) pelo comprimento inicial (L_0):

$$n_\varepsilon = \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_P} = \frac{\Delta L_B L_{0P}}{\Delta L_P L_{0B}} = 1 \quad (26)$$

Da Equação 26, obtém-se a igualdade da Equação 27:

$$n_{\Delta L} = n_L \quad (27)$$

O valor de n_L é o fator de escala geométrico no qual se pretende reduzir. Ou seja, a relação entre o comprimento do componente da bancada de laboratório (L_B)

e o comprimento do componente equivalente da plataforma real (L_P). Com essa condição estabelecida pelo número de Cauchy, qualquer mudança no comprimento de uma das estruturas requer a mudança na mesma proporção na outra. A Equação 28 estabelece a relação do fator de força elástica (n_{FE}) que atua na coluna e o fator de escala geométrico (PAHL, G. et al., 2007):

$$n_{FE} = \frac{\sigma_B A_B}{\sigma_P A_P} = n_L^2 \quad (28)$$

A igualdade da Equação 28 ocorre, devido ao fator de área (n_A) ser equivalente ao quadrado do fator de escala geométrico. Considerando o mesmo material nas duas estruturas e submetidos a mesma aceleração da gravidade, o fator da força de inércia (n_{FI}), ou peso, é determinado pela Equação 29:

$$n_{FI} = \frac{m_B g}{m_P g} = \frac{\rho_B V_B g}{\rho_P V_P g} = n_L^3 \quad (29)$$

A similaridade dinâmica entre as estruturas só existirá, se o fator de tempo (n_t) e o fator geométrico (n_L) forem iguais. Então, o fator de velocidade de rotação é definido pela Equação 30 (PAHL, G. et al., 2007):

$$n_{rpm} = \frac{t_P}{t_B} = n_L^{-1} \quad (30)$$

Da mesma forma, a Equação 31 determina o fator de ROP:

$$n_{ROP} = \frac{L_B t_P}{t_B L_P} = 1 \quad (31)$$

O fator de aceleração é calculado pela Equação 32:

$$n_a = \frac{L_B t_P^2}{t_B^2 L_P} = \frac{n_L}{n_t^2} = n_L^{-1} \quad (32)$$

O fator de conversão de forças é determinado pela Equação 33:

$$n_F = \frac{m_B a_B}{m_P a_P} = \frac{\rho_B V_B a_B}{\rho_P V_P a_P} = n_L^2 \quad (33)$$

O fator de vazão é calculado pela Equação 34:

$$n_v = \frac{V_B^3 t_P}{t_B V_P^3} = \frac{n_L^3}{n_t} = n_L^2 \quad (34)$$

O fator de torque para estruturas fabricadas com o mesmo material é definido pela Equação 35:

$$n_T = \frac{m_B a_B L_B}{m_P a_P L_P} = \frac{\rho_B V_B a_B L_B}{\rho_P V_P a_P L_P} = n_L^3 \quad (35)$$

O fator de potência é calculado pela Equação 36:

$$n_P = \frac{m_B a_B L_B t_P}{m_P a_P L_P t_B} = \frac{\rho_B V_B a_B L_B t_P}{\rho_P V_P a_P L_P t_B} = n_L^2 \quad (36)$$

O Quadro 15 resume os principais parâmetros de conversão de escala.

Quadro 15 - Principais parâmetros de conversão aplicados a modelos de plataformas

Parâmetros	Conversão de Escala
Velocidade de rotação	n_L^{-1}
ROP	$n_L^0 = 1$
Comprimento e Diâmetro	n_L^1
Área, Forças, Potência e Vazão do fluido	n_L^2
Volume, Torque e WOB	n_L^3

Fonte: Autoria própria

Se o objetivo for a conversão do diâmetro da coluna de perfuração de uma plataforma, o diâmetro da coluna da bancada de laboratório seria o equivalente ao produto da escala determinada (n_L) pelo diâmetro da coluna da plataforma, em caso

de se desejar a similaridade entre as duas estruturas fabricadas com o mesmo material.

4.6.1 Avaliação das Equações de Conversão de Escala

Uma primeira análise das equações de conversão de escala, definidas no Quadro 15, se faz necessário. Para isso, parâmetros geométricos e parâmetros calculados de forma preliminar são expandidos em uma escala 5:1. A Tabela 3 apresenta os resultados da conversão. Os dados conhecidos da bancada de laboratórios são inseridos na coluna Bancada, os resultados da conversão, em escala, são mostrados na coluna Plataforma.

Tabela 3 - Avaliação das equações de conversão de escala

Parâmetros	Bancada	Plataforma
Comprimento da coluna (mm)	1500	7500,00
Diâmetro externo da coluna (mm)	40	200,00
Diâmetro interno da coluna (mm)	30	150,00
Diâmetro da broca (mm)	140	700,00
Velocidade angular da coluna (rpm)	800	160,00
Força horizontal no cortador (N)	3048	76200,00
WOB (N)	2000	250000,00
Torque (Nm)	213,4	26675,00
Vazão (l/min)	483	12075,00
ROP (mm/s)	1,14	1,14

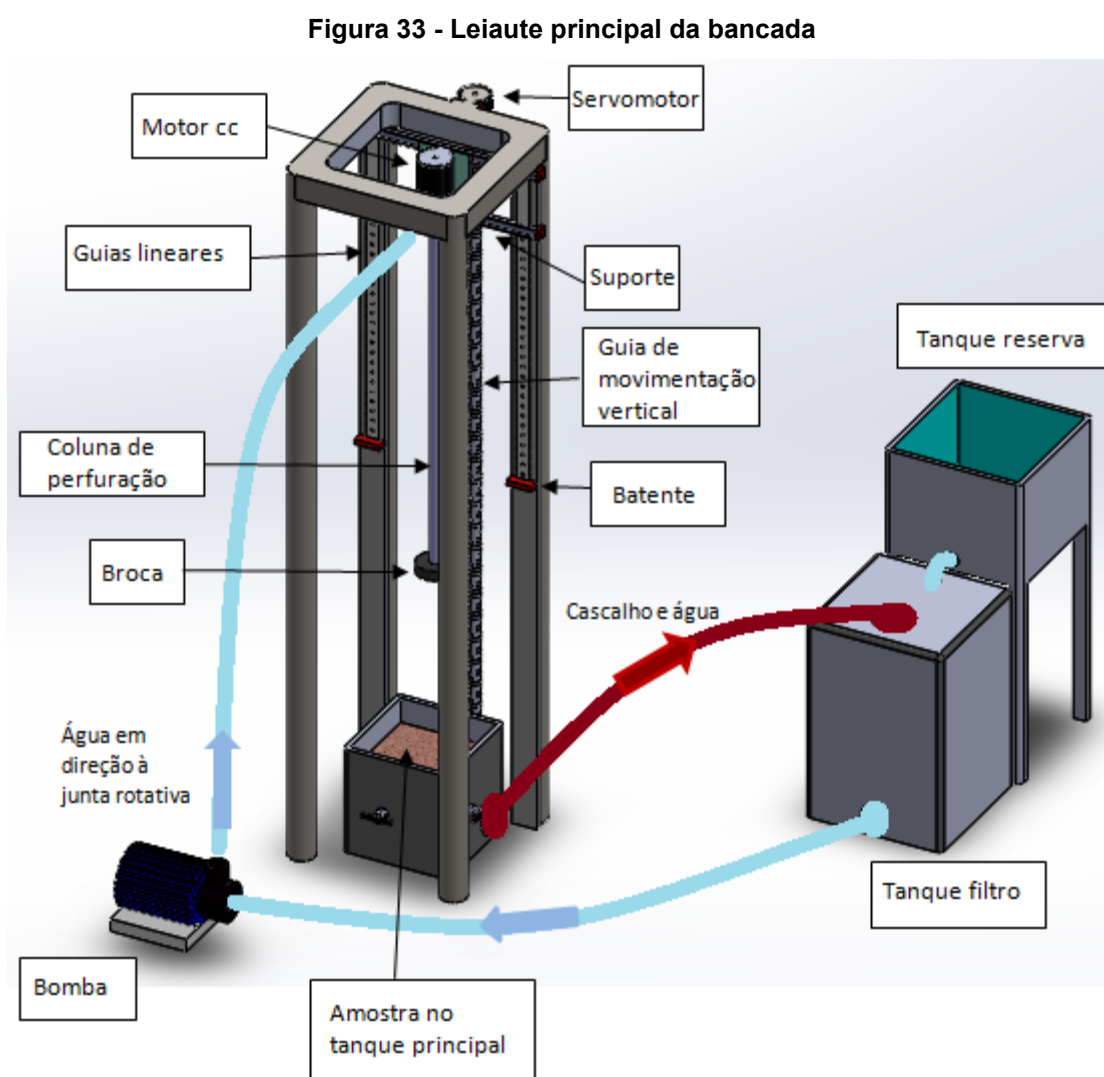
Fonte: Autoria própria

Os resultados revelam os desafios de se manter as semelhanças geométricas, cinemáticas e dinâmicas, entre a bancada e a plataforma de perfuração. A conversão do diâmetro da broca de 140 milímetros resulta em uma ferramenta na plataforma com diâmetro de 700 milímetros, ou seja, dimensão superior ao das brocas utilizadas por muitas operadoras de poços de perfuração no mundo (AMORIM JUNIOR, 2008). Entretanto, a tabela de conversão evidencia um grande potencial de aplicação de conversão de escala para a comparação de estruturas de perfuração em tamanhos diferentes, principalmente, para fatores de escala pequenos em seções de colunas de plataformas reais, como observado por

Westermann et al. (2015). Se o objetivo dos testes experimentais na bancada for de investigar as características de corte da broca utilizada, a avaliação de uma seção mais próxima da ferramenta, e mais rígida, é a escolha mais adequada (SRIVASTAVA; TEODORIU, 2019).

4.7 LEIAUTE PRELIMINAR DA BANCADA

Com as dimensões e características geométricas da bancada determinadas ao longo do capítulo é possível desenvolver o leiaute do pré-projeto preliminar do dispositivo no *Solidworks*. A Figura 33 apresenta o leiaute principal da bancada de laboratório. Os desenhos e dimensões das vistas da bancada estão apresentados no Apêndice C.



Fonte: Autoria própria

A bancada conta com um suporte para a interface entre o sistema de rotação e o sistema de movimentação vertical do dispositivo, que é fixado em dois pilares que se movimentam sobre a superfície dos guias lineares. A região frontal do suporte sustenta o motor de corrente contínua, acoplado à coluna de perfuração. Já na parte posterior do suporte, uma alça se move sobre o guia de movimentação vertical da estrutura, que é acionado pelo servomotor.

A combinação de servomotor com fuso de esferas oferece um sistema de movimentação vertical com precisão de posicionamento, menos ocorrência de vibrações e ótima capacidade de transmissão de torque, características fundamentais para um maior controle da penetração da broca na superfície perfurada. A configuração do sistema de movimentação proposta neste trabalho é similar ao sistema de movimentação vertical das estruturas utilizadas nas pesquisas de Bavadiya et al. (2017) e Egeland et al. (2017), e fornece estabilidade para o processo de perfuração, além de melhorar a distribuição das tensões decorrentes da força axial, ou peso sobre a broca, que o servomotor provê ao sistema.

O batente, posicionado após o curso de um metro de movimentação vertical da coluna, se faz necessário para maior segurança no processo de perfuração. Essa é uma solução simples para prevenção de acidentes, decorrentes da inabilidade ou descuido do operador, e um agente limitante para possíveis situações onde a bancada perfure não somente a parte inferior do tanque principal, mas também o piso do laboratório, gerando ruídos e custos inesperados de manutenção. As bancadas empregadas nos trabalhos de Tingey (2015) e Khadisov et al. (2019) utilizaram sensores que, também, podem ser úteis para alertar o sistema sobre possíveis colisões de fim de curso da estrutura. Entretanto, para o presente trabalho, uma barreira física se mostra mais confiável, já que sensores podem falhar.

Uma estrutura de perfuração feita em aço é o ideal para a situação onde se deseja avaliar a influência dos principais parâmetros de perfuração na taxa de penetração da broca. Além disso, as bancadas recentes manufaturadas nesse metal foram menos propensas à flambagem e às vibrações, que as bancadas em alumínio, por exemplo. O projeto conceitual desenvolvido neste trabalho não define os materiais que serão empregados na fabricação da bancada, ainda assim, é esperado que o material utilizado na confecção da bancada de laboratório, principalmente da coluna de perfuração, seja similar ao material da plataforma em

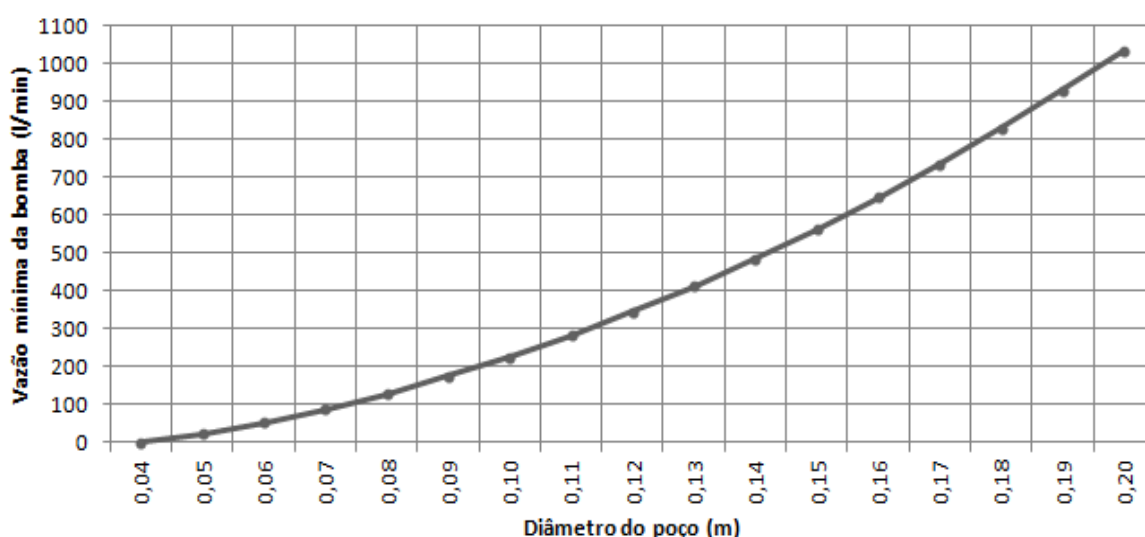
campo. Sendo assim, as equações de similaridade poderão ser aplicadas para a comparação de testes efetuados por dispositivos com dimensões diferentes.

Ao lado dos parâmetros de peso sobre a broca e de velocidade de rotação da coluna de perfuração, a vazão do fluido de perfuração é um dos principais parâmetros de entrada em perfurações de poços. No resultado do dimensionamento da bomba, apresentado na subseção 4.4.1, a vazão foi um dos parâmetros com maior discrepância em relação à grandeza definida nos requisitos do projeto. A vazão calculada para bomba carrear os cascalhos da perfuração foi de 483 l/min, valor superior à medida de 15 l/min definida no projeto. Se faz necessário avaliar de que forma o diâmetro do poço influencia na vazão da bomba, mantendo todas características do escoamento constantes. Para efeito de cálculo na Equação 37, o diâmetro externo da coluna está fixado em 0,04 m e a eficiência no transporte de cascalhos é de 50%.

$$Q = v_f A_n \quad (37)$$

A Figura 34 revela que o acréscimo no diâmetro do poço tende a aumentar a vazão requerida da bomba para escoar o fluido com cascalho.

Figura 34 - Relação entre a vazão da bomba e o diâmetro do poço

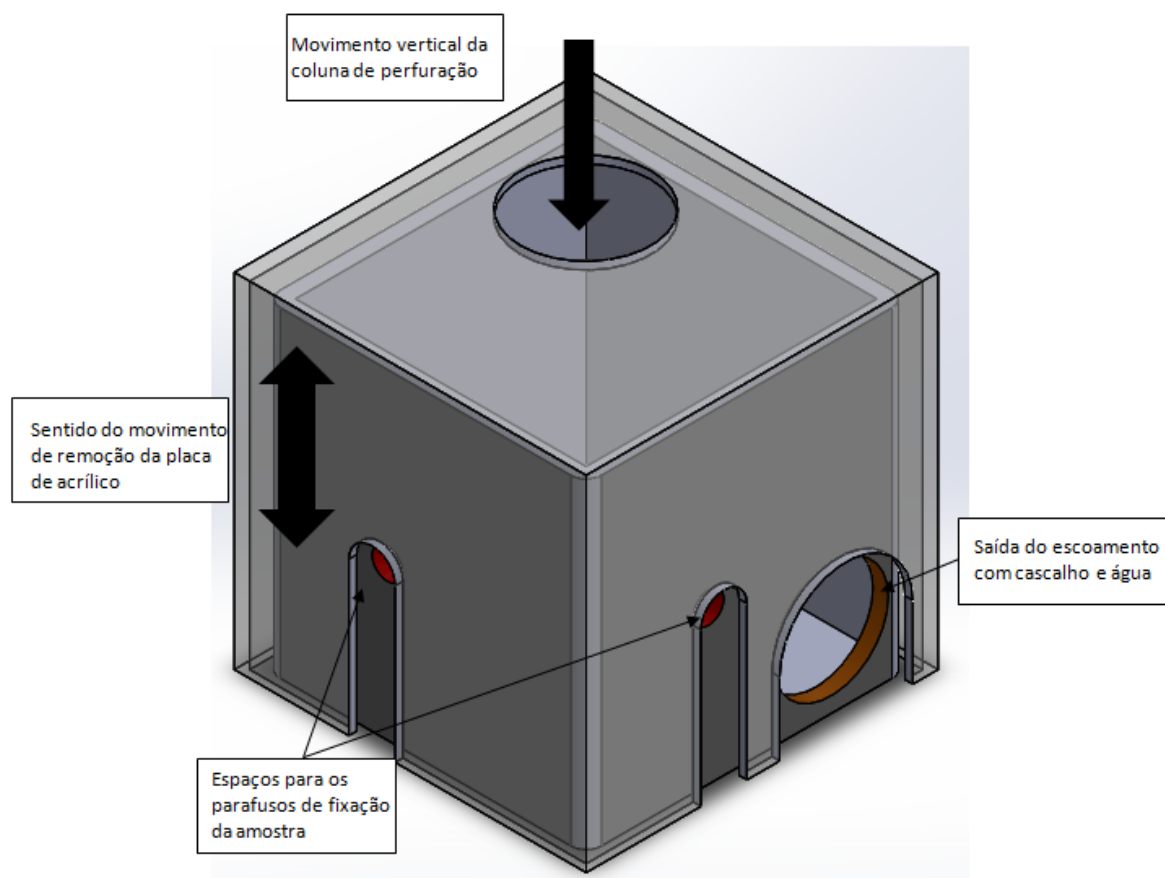


Fonte: Autoria própria

O cuidado com a segurança dos operadores e dos componentes da bancada de laboratório é uma das demandas dos requisitos de projeto. O ambiente de

perfuração de extrato rochoso é sujo, com grande quantidade de lama, de pó, de cascalhos, além de ser um meio propício à oxidação de estruturas metálicas da bancada. A Figura 35 mostra a solução encontrada, com uma placa de acrílico, para proteção dos operadores e dos componentes da coluna de perfuração. O movimento vertical para remoção e limpeza da placa é simples e com custo de implementação baixo. A estrutura possui vãos correspondentes aos parafusos de fixação da amostra, a tubulação de saída do escoamento do tanque, além de espaço circular, na região superior do tanque, por onde a coluna de perfuração dirige-se até à amostra. Essa solução propicia mais proteção à equipe do laboratório, com uma região de perfuração mais limpa, estendendo a vida útil dos principais componentes da bancada de perfuração.

Figura 35 - Tanque principal com a proteção de uma placa de acrílico



Fonte: Autoria própria

A concepção desenvolvida até a etapa de pré-projeto preliminar propicia a execução das principais demandas da seção 3.1, nos requisitos do projeto da

bancada de laboratório. As faixas de operação do motor de corrente contínua, do servomotor e da bomba centrífuga possibilitam avaliar a influência da velocidade de rotação da coluna de perfuração, do peso aplicado à broca para perfurar e da vazão do fluido de perfuração, respectivamente, no torque e na taxa de penetração da broca. A conexão rosqueada entre a coluna de perfuração e a broca permite a substituição, de forma mais ágil, do modelo de broca utilizado para perfurar, possibilitando a análise da ação da geometria do cortador da ferramenta na eficiência do processo de perfuração. E por fim, o leiaute do tanque principal viabiliza testes de perfuração de até 300 milímetros de profundidade, com segurança, permitindo a avaliação da influência do tipo de rocha na efetividade da broca.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras na área.

5.1 CONCLUSÕES

A compreensão das principais variáveis que influenciam na eficiência de perfuração é essencial para a redução dos custos milionários inseridos nas operações de perfuração de poços de óleo e gás no Brasil. Os dispositivos experimentais, em escala, podem se tornar uma solução mais acessível para o entendimento dos variados fenômenos que ocorrem em perfurações de rochas. O presente trabalho propôs o projeto mecânico conceitual de uma bancada experimental de laboratório, em escala reduzida, para investigar o processo de perfuração em extrato rochoso para extração de petróleo e gás, a partir de simulações de perfuração com combinações entre os principais parâmetros envolvidos no processo, tais como: peso sobre a broca, velocidade de rotação da coluna de perfuração, vazão do fluido de perfuração, características da região a ser perfurada, entre outros.

O primeiro objetivo específico traçado para a concepção da bancada foi a definição dos principais parâmetros de perfuração de poços e as relações entre eles. A vazão do fluido de perfuração tem a função principal de limpar os cascalhos decorrentes da quebra das rochas. A litologia é uma característica inerente às rochas, não podendo ser alterada. Assim, o peso sobre a broca e a velocidade de rotação da coluna de perfuração são parâmetros mais efetivos para manipulação, se o objetivo é o aumento na taxa de penetração da broca. Porém, a determinação da melhor combinação entre os dois parâmetros não é uma tarefa fácil, dependendo, também, dos outros parâmetros abordados. A escolha de uma combinação inadequada pode causar, entre outras coisas, a redução da vida útil dos componentes da coluna de perfuração, além do acréscimo no custo operacional de perfuração em milhões de reais.

A bancada de laboratório concebida neste trabalho possibilita experimentos com múltiplas combinações de parâmetros de perfuração. Trata-se de uma estrutura

vertical com 2,8 m de altura e quatro colunas de apoio, possibilitando mais estabilidade na perfuração. A coluna de perfuração é acoplada na base de uma coluna independente, responsável pelo posicionamento vertical da estrutura, comandada por um servomotor conectado à extremidade de um sistema de transmissão mecânica de fuso de esferas. Os servomotores são motores elétricos com elevada precisão, ideais para aplicação em dispositivos que demandam alta capacidade de posicionamento. Um motor de corrente contínua foi selecionado para rotacionar a coluna de perfuração, de 1,5 m de comprimento, em até 800 rpm, máxima velocidade de rotação definida no projeto.

Os cálculos de esforços preliminares dos principais sistemas da bancada forneceram informações importantes para o dimensionamento dos motores que providenciam energia para a estrutura de perfuração. A potência mínima do servomotor calculada para suportar o sistema de içamento da coluna foi de 0,22 cv, empregando o valor máximo de peso sobre a broca e de velocidade de rotação da coluna de perfuração, definidos nos requisitos do projeto. O modelo de Hareland e Rampersad (1994), para um cortador PDC, proveu a taxa de penetração de 1,14 mm/s, valor próximo ao da maioria das bancadas similares avaliadas. O torque necessário para girar a broca foi de 213,4 Nm, valor superior aos requisitos do projeto, mas condizente com a capacidade operacional da bancada de máxima velocidade de rotação e de peso sobre a broca. A força axial máxima que a estrutura, dimensionada em aço AISI 1080 temperado e revenido, pode suportar, sem flambar, é de aproximadamente 18,84 kN, valor superior ao WOB máximo de 2 kN. Através do modelo de Rajabov et al. (2012) é possível calcular a potência mínima necessária para que o motor de corrente contínua rotacione e corte a amostra, e este valor calculado foi de 27 cv.

O efeito do estudo da vazão do fluido de perfuração foi pouco explorado nos protótipos de bancadas de laboratório avaliados. Uma das principais razões para isso está no desafio de se manter a circulação do fluido após a filtragem, sem que haja perda de eficiência na limpeza dos cascalhos. Este trabalho forneceu uma concepção de sistema de circulação com o tanque principal, conectado ao tanque filtro, com sistema de filtragem horizontal, localizado em um nível inferior ao tanque reserva. O tanque reserva é responsável por suprir o sistema com água, o fluido

escolhido para circulação, quando o nível do reservatório estiver menor do que o necessário para o carreamento dos cascalhos.

Para o dimensionamento da bomba, que fornece energia para o sistema de circulação, estabeleceu-se uma eficiência de 50% no transporte de cascalhos. A vazão mínima calculada para bomba foi de 483 l/min, valor muito superior à grandeza definida nos requisitos de projeto, de 15 l/min. Isto se deve à área do espaço anular, quanto maior o diâmetro do poço, mantendo o diâmetro externo da coluna constante, maior será a robustez do dispositivo de bombeamento para a limpeza dos cascalhos gerados durante a perfuração das rochas.

Os sensores de aquisição de dados são essenciais para o controle e segurança dos sistemas da bancada. Entre principais sensores contemplados no projeto, podem-se citar: i/ célula de carga para medir o WOB; ii/ transdutores de pressão para monitorar a variação de pressão na bomba; iii/ medidor de vazão da bomba; iv/ sensor de deslocamento da coluna para determinação do ROP; v/ acelerômetro para monitoramento das vibrações na coluna de perfuração; e vi/ sensor de nível de água no tanque filtro.

Na maioria das pesquisas revisadas no capítulo 2, buscou-se entender o comportamento das vibrações sobre a coluna de perfuração, em operação, e a influência desses movimentos na eficiência do processo, sem a preocupação de replicar as grandezas, e os resultados, para as plataformas reais. Essa lacuna foi abordada na concepção da bancada do presente trabalho, preservando o número adimensional de Cauchy. A similaridade completa entre bancadas de laboratório e plataformas reais, com centenas de toneladas de aço e alcance de vários quilômetros, é inatingível. Porém, a análise de seções de colunas de perfuração reais, em vez de toda a extensão da estrutura, se revelou como a estratégia mais efetiva. Assim, a comparação entre parâmetros como forças atuantes no cortador, WOB, torque, vazão do fluido e ROP, fornecem informações essenciais para avaliação de dispositivos de perfuração, em tamanhos diferentes.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Melhorias no projeto da bancada podem ser implementadas em trabalhos futuros. Como sugestões, podem-se citar:

- Análise da viabilidade econômica da concepção escolhida;
- Avaliação estrutural por elementos finitos da bancada;
- Desenvolvimento do projeto detalhado da bancada;
- Avaliação junto aos pesquisadores do CERNN sobre a possibilidade de combinar o tanque principal e o tanque filtro em um único tanque;
- Desenvolvimento de sistema automático no tanque reserva para prover fluido ao sistema de circulação sem o emprego de válvula manual;
- Construção física do protótipo deste trabalho;
- Desenvolvimento de todo o processo de automação e controle da bancada;
- Desenvolvimento do programa de experimentos da bancada;
- Aplicação das equações de conversão de escala, em dispositivos de tamanhos diferentes, para compreensão dos resultados dos experimentos.

REFERÊNCIAS

AADNOY, B.; LOOYEH, R. **Petroleum rock mechanics**: drilling operations and well design. 1. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2011.

AMORIM JUNIOR, D. S. **Metodologia para a redução de custos na perfuração de poços de petróleo e gás**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-29012009-110255/publico/Dissertacao_Dalmo_Amorim_Petroleo_Revisada.pdf>. Acesso em: 8 maio 2020.

ANTWI, E. K.; LIU, K.; WANG, H. A review on ductile mode cutting of brittle materials. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 13, n. 2, p. 251-263, 2018.

ARIF, M.; RAHMAN, M.; SAN, W. Y. Analytical model to determine the critical feed per edge for ductile–brittle transition in milling process of brittle materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 3, p. 170-181, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro, 2018.

BAVADIYA, V. A.; *et al.* Design, construction and operation of an automated drilling rig for the DSATS university competition. In: **SPE annual technical conference and exhibition**. Society of Petroleum Engineers, Houston, p. 1-18, 2015. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/15ATCE/2-15ATCE/D021S014R001/180376>>. Acesso em: 6 jan. 2020.

BAVADIYA, V. A.; *et al.* Experimental investigation of the effects of rotational speed and weight on bit on drillstring vibrations, torque and rate of penetration. In: **Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference**. Society of Petroleum Engineers, Abu Dhabi, p. 1-22. 2017. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEADIP/proceedings-abstract/17ADIP/3-17ADIP/D031S070R006/200144>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

BAXTER, M. R. **Projeto de produto**: guia prático para o design de novos produtos. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2000.

BELTRÃO, P. A. **Analysis of the potential for ductile mode machining of ferroelectric materials**. 1998. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Cranfield University, Cranfield, 1998.

BESTEQUIP. **Guias de movimento linear**. 2021. Disponível em: <<https://www.amazon.com/BestEquip-HGR20-2000mm-RM1605-2000mm-Ballscrew-Routers/dp/B083CYMZVZ>>. Acesso em: 2 jan. 2021.

BIFANO, T. G.; DOW, T. A.; SCATTERGOOD, R. O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. **Journal of Engineering for industry**, v. 113, p. 184-189, 1991.

BILGESU, H.; *et al.* A real-time interactive drill-off test utilizing artificial intelligence algorithm for DSATS drilling automation university competition. In: **SPE Western Regional Meeting**. Society of Petroleum Engineers, Bakersfield, p. 1-12, 2017. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEWRM/proceedings-abstract/17WRM/4-17WRM/D041S015R001/196052>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

BIRK, L. **Fundamentals of ship hydrodynamics**: fluid mechanics, ship resistance and propulsion. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.

BOURGOYNE JR, A.T.; *et al.* **Applied drilling engineering**. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1991.

BRASIL. Ministério da Economia. **NR-12 – Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. n. 916. Brasília: Ministério da Economia, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-12.pdf/view>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. Tradução de João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CARRAPATOSO, C. M. **Análise dos modelos analíticos de otimização de perfuração baseados em energia específica para formações evaporíticas**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=17928@1>>. Acesso em: 18 jan. 2020.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G. **Instrumentation for engineering measurements**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1984.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

EGELAND, R. L.; *et al.* **Design and construction of an autonomous, miniature drilling rig**. Contribution to the Drillbotics™ Competition – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2017. Disponível em: <<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2458492>>. Acesso em 15 ago. 2020.

ESMAEILI, A.; *et al.* Laboratory scale control of drilling parameters to enhance rate of penetration and reduce drill string vibration. In: **SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition**. Society of Petroleum Engineers, Al-Khobar, p. 1-9, 2012. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPESATS/proceedings-abstract/12SATS/All-12SATS/SPE-160872-MS/159122>>. Acesso em: 2 fev. 2020.

FORSTER, I.; MACFARLANE, A. H. W.; DINNIE, R. Asymmetric vibration damping tool-small scale rig testing and full scale field testing. In: **IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition**. Society of Petroleum Engineers, New Orleans, p. 1-29, 2010. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEDC/proceedings-abstract/10DC/All-10DC/SPE-128458-MS/106660>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FORSTER, I. Axial excitation as a means of stick slip mitigation-small scale rig testing and full scale field testing. In: **SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition**. Society of Petroleum Engineers, Amsterdam, p. 1-28, 2011. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEDC/proceedings-abstract/11DC/All-11DC/SPE-139830-MS/149401>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Tradução de Geraldo Augusto Campolina França, Ricardo Nicolau Nassar Koury. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2001.

FRANCA, L. F. P. Drilling action of roller-cone bits: modeling and experimental validation. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 132, n. 4, p. 1-9, 2010.

FREUDENRICH, C.; STRICKLAND, J. **How oil drilling works**. 2001. Disponível em: <<https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/oil-drilling4.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

GANDELMAN, R. A. **Predição da ROP e otimização em tempo real de parâmetros operacionais na perfuração de poços de petróleo offshore**. 2012. 195 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://epqb.eq.ufrj.br/download/predicao-da-rop-e-otimizacao-em-tempo-real.pdf>>. Acesso em: 5 ago. 2020.

GAO, C. **Petroleum drilling technology**. Beijing: Science Press, 2017.

GERALDI, J. L. P. **O ABC das escavações de rocha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

GOEL, S.; *et al.* Brittle–ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 65, p. 15-21, 2013.

GOODNO, B. J.; GERE, J. M. **Mechanics of materials**. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2018.

GUO, B.; LIU, G. **Applied drilling circulation systems**: hydraulics, calculations and models. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2011.

HAQUE, M. N.; AL-KHAIAT, H.; KAYALI, O. Strength and durability of lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 4, p. 307-314, 2004.

HARELAND, G.; RAMPERSAD, P. R. Drag-bit model including wear. In: **SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference**. Society of Petroleum Engineers, Buenos Aires, p. 657-667, 1994. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPELACP/proceedings-abstract/94LACPEC/All-94LACPEC/SPE-26957-MS/55817>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

HARELAND, G.; *et al.* Cutting efficiency of a single PDC cutter on hard rock. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, v. 48, n. 06, p. 60-65, 2009.

HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 3, p. 293-306, 2011.

HIWIN. **Ballscrew**. Technical information, HIWIN Technologies Corp, Taiwan, 2018. Disponível em: <<https://www.hiwin.com/pdf/ballscrews.pdf>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

HOSSAIN, M. E.; AL-MAJED, A. A. **Fundamentals of sustainable drilling engineering**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

HYNE, N. J. **Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling, and production**. 3. ed. Tulsa: PennWell Books, 2012.

KALANTARI, S.; BAGHBANAN, A.; HASHEMALHOSSEINI, H. An analytical model for estimating rock strength parameters from small-scale drilling data. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 135-145, 2019.

KAPITANIAK, M.; *et al.* Unveiling complexity of drill-string vibrations: Experiments and modelling. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 101, p. 324-337, 2015.

KHADISOV, M.; *et al.* Developments and experimental tests on a laboratory-scale drilling automation system. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, p. 1-17, 2019. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/335485481_Developments_and_experimental_tests_on_a_laboratory-scale_drilling_automation_system>. Acesso em: 4 mar. 2020.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1: cutting**. Tradução de Aaron Kuchle. Berlim: Springer, 2011.

KOVALYSHEN, Y. Experiments on stick-slip vibrations in drilling with drag bits. In: **48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium**. American Rock Mechanics Association, Minneapolis, 2014. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/287271716_Experiments_on_stick-slip_vibrations_in_drilling_with_drag_bits>. Acesso em: 5 fev. 2020.

KUNG, S. C. **Previsão de taxas de penetração na perfuração de poços de petróleo com brocas de cortadores fixos**. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/389-msc-pt-2016/4692-stephan-de-carvalho-kueng>>. Acesso em: 04 abr. 2020.

KURU, E., WOJTANOWSICZ, A. K. A method for detecting in-situ PDC bit dull and lithology change. In: **SPE/IADC Drilling Conference**. Society of Petroleum Engineers, Dallas, p. 137-152, 1988.

LAIK, S. **Offshore petroleum drilling and production**. Boca Raton: CRC Press, 2018.

LIU, K. et al. A study of the cutting modes in the grooving of tungsten carbide. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 24, n. 5-6, p. 321-326, 2004.

LIU, K.; WANG, H.; ZHANG, X. **Ductile mode cutting of brittle materials**. Cingapura: Springer, 2020.

LOEKEN, E. A.; *et al.* Design principles behind the construction of an autonomous laboratory-scale drilling rig. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 8, p. 62-69, 2018.

LYONS, W. C. **Standard handbook of petroleum and natural gas engineering**. v. 1. Houston: Gulf Publishing Company, 1996.

LYONS, W. C.; PLISGA, G. J.; LORENZ, M. D. **Standard handbook of petroleum and natural gas engineering**. 3. ed. Waltham: Elsevier, 2015.

MA, Y.; *et al.* Cutter layout optimization for reduction of lateral force on PDC bit using Kriging and particle swarm optimization methods. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 163, p. 359-370, 2018.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1997.

MARIBONDO, J. F. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares**. 2000. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78467>>. Acesso em: 2 jul. 2020.

MARQUEZ, A.; TEODORIU, C. A novel drillstring dynamics experimental setup to be integrated into hardware in the loop capable drilling simulators. In: **ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Trondheim, p. 1-7, 2017.

Disponível em:

<<https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2017/57762/V008T11A026/282536>>. Acesso em: 6 mar. 2020.

MATWEB. **Material property data**. 2021. Disponível em:

<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8119e51fb97d400daf27532b2adcddc3>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

MITCHELL, F. R.; LAKE, W. L. **Petroleum engineering handbook**. v. 2. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2006.

MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: Ipea-Petrobras, 2013.

NAKASUJI, T.; *et al.* Diamond turning of brittle materials for optical components. **CIRP**, v. 39, n. 1, p. 89-92, 1990.

OLANDOSKI, E. F.; VIDAL, H. A. L. N. **Desenvolvimento de dispositivo etiquetador de carnês de IPTU**. 2011. 208 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PAHL, G.; *et al.* **Engineering design: a systematic approach**. Tradução de Ken Wallace, Luciënne Blessing. 3. ed. Londres: Springer, 2007.

PATIL, P. A.; TEODORIU, C. A comparative review of modelling and controlling torsional vibrations and experimentation using laboratory setups. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 112, p. 227-238, 2013.

PAULAUSKIENE, T. Petroleum extraction engineering. In: **Recent Insights in Petroleum Science and Engineering**. Rijeka: IntechOpen, p. 31-53, 2018.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/322987413_Petroleum_Extraction_Engineering>. Acesso em: 2 mar. 2021.

PEREZ, S.; KARAKUS, M.; PELLET, F. A study on the wear process of impregnated diamond bits via acoustic emission. **Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future**, v. 50, n. 5, p. 1289-1301, 2017.

PETROBRAS. **Petrobras reduz pela metade tempo e custo de construção de poço no pós-sal**. 2020. Disponível em:

<https://www.agenciapetrobras.com.br/Materia/ExibirMateria?p_materia=982886>.

Acesso em: 11 nov. 2020.

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

RAJABOV, V.; *et al.* The effects of back rake and side rake angles on mechanical specific energy of single PDC cutters with selected rocks at varying depth of cuts and confining pressures. In: **IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition**. Society of Petroleum Engineers, San Diego, p. 1-17, 2012. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEDC/proceedings-abstract/12DC/All-12DC/SPE-151406-MS/156604>>. Acesso em: 2 jun. 2020.

RAOUS, M.; ALI KARRAY, M. Model coupling friction and adhesion for steel concrete interfaces. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 34, n. 1, p. 42-51, 2009.

SCHROETER, R. B. **Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho**. 1997. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77328>>. Acesso em: 5 ago. 2020.

SCHULTZ, R. A. **Geologic fracture mechanics**. Nova York: Cambridge University Press, 2019.

SETHAMBARAM, C. N. **Numerical simulation of rock-cutter interaction in drilling operation using ANSYS AUTODYN 3D**. 2016. 41 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universiti Teknologi PETRONAS, Bandar Seri Iskandar, 2016. Disponível em: <http://utpedia.utp.edu.my/17058/1/FYP_Dissertation_16046.pdf>. Acesso em: 5 out. 2020.

SIFFERMAN, T. R.; BECKER, T. E. Hole cleaning in full-scale inclined wellbores. **SPE Drilling Engineering**, v. 7, n. 02, p. 115-120, 1992.

SMITH, C. **Design, construction, and analysis of a pilot-scale automated drilling platform**. 2017. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo e Gás) – West Virginia University, Morgantown, 2017. Disponível em:

<<https://researchrepository.wvu.edu/etd/6676/>>. Acesso em: 4 out. 2020.

SRIVASTAVA, S.; TEODORIU, C. An extensive review of laboratory scaled experimental setups for studying drill string vibrations and the way forward. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 182, p. 1-15, 2019.

TAVARES, R. M. **Interpretação e análise de dados de perfuração em poços de petróleo**. 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em:

<http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/263676/1/Tavares_RogérioMartins_M.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2020.

THENEVIN, I.; *et al.* Laboratory pull-out tests on fully grouted rock bolts and cable bolts: results and lessons learned. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 843-855, 2017.

TINGEY, D. J. **Design, fabrication and preliminary testing of experimental rock drilling rig**. 2015. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Texas A&M University, College Station, 2015. Disponível em:

<<https://core.ac.uk/download/pdf/147245516.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Padrões UTFPR para elaboração de trabalhos acadêmicos e científicos**. Curitiba, 2018. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/comissoes/consulta/elaboracao-de-trabalhos-academicos-e-cientificos/padroes-utfpr-para-trabalhos>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

WANG, Y.; LUO, H. Ways to improve the drilling effectiveness of rock bits by a tribological method. **ASLE/ASME Tribology Conference**, San Antonio, v. 110, p. 212-215, 1988.

WARREN, T.; *et al.* Casing drilling with retrievable drilling assemblies. In: **Offshore Technology Conference**, Houston, p. 1-11, 2004. Disponível em: <<https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/04OTC/All-04OTC/OTC-16564-MS/34907>>. Acesso em 25 fev. 2021.

WESTERMANN, H.; *et al.* A new test rig for experimental studies of drillstring vibrations. **SPE Drilling & Completion**, v. 30, n. 02, p. 119-128, 2015.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. Tradução de Mario Moro Fecchio, Nelson Manzanares Filho, José Carlos Cesar Amorim. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

WIKTORSKI, E.; *et al.* Comparative study of surface and downhole drillstring vibrations measurements on a laboratory-scale drilling rig. In: **SPE Norway One Day Seminar**. Society of Petroleum Engineers, Bergen, p. 1-16, 2019. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEBERG/proceedings-abstract/19BERG/1-19BERG/D011S008R002/217438>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

YANG, Y.; *et al.* Kinematic and bottom-hole pattern analysis of a composite drill bit of cross-scraping. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 231, n. 17, p. 3104-3117, 2017.

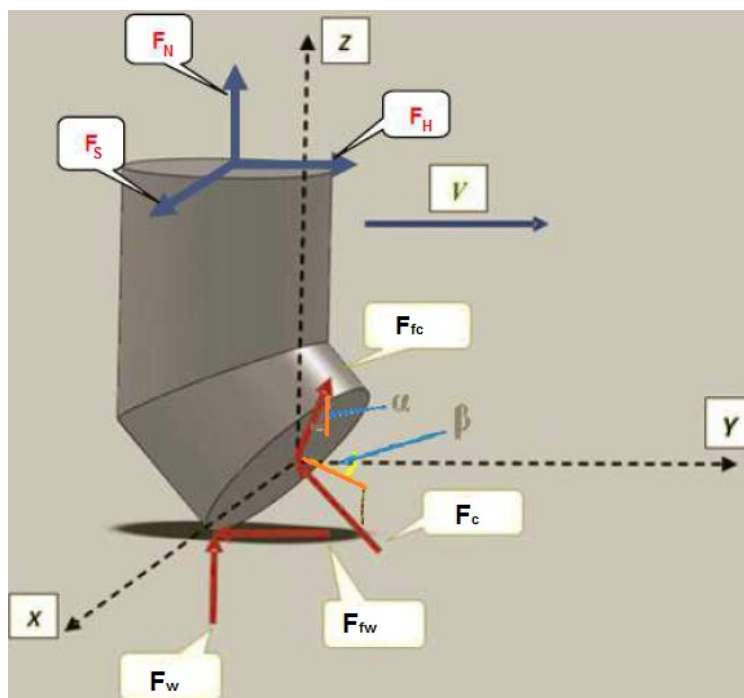
ZHANG, Z. **Rock fracture and blasting: theory and applications**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

ZHOU, M.; *et al.* Brittle–ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 121, n. 2-3, p. 243-251, 2002.

APÊNDICE A – MODELO DE RAJABOV

Conforme mostrado na Figura A.1, o modelo proposto por Rajabov et al. (2012) é baseado no equilíbrio estático das forças que agem na superfície do cortador PDC na interação com a rocha.

Figura A.1 - Forças atuando no cortador PDC



Fonte: Adaptado de Rajabov et al. (2012)

As seguintes forças externas atuam no cortador durante a perfuração, são elas: força de corte perpendicular à superfície do cortador F_C , força de atrito na interface cortador/rocha F_{fc} , força de desgaste atuando perpendicularmente ao cortador F_w e a força de atrito em decorrência do desgaste entre o plano de desgaste e a rocha F_{fw} .

As forças são o resultado do comportamento das rochas enquanto são cortadas na interação com o cortador da broca. Com base no equilíbrio das forças externas do cortador chegam-se as Equações A.1, A.2 e A.3:

$$F_H = F_C \cos \alpha \cos \beta - F_{fc} \sin \alpha \cos \beta + F_{fw} \quad (A.1)$$

$$F_S = F_C \cos \alpha \sin \beta - F_{fc} \sin \alpha \sin \beta \quad (A.2)$$

$$F_N = F_C \text{sen} \alpha + F_{fc} \text{cos} \alpha + F_w \quad (A.3)$$

Onde:

F_H = Componente da força horizontal (N).

F_S = Componente da força cisalhante (N).

F_N = Componente de força normal (N).

α = Ângulo de ataque (graus).

β = Ângulo de saída lateral (graus).

Desenvolvendo as Equações A.4 e A.5 e substituindo nas Equações A.6 e A.7:

$$F_C = R_C A_C \quad (A.4)$$

$$F_w = R_p A_w \quad (A.5)$$

$$F_{fc} = \mu F_C = \mu R_C A_C \quad (A.6)$$

$$F_{fw} = \mu F_w = \mu R_p A_w \quad (A.7)$$

Onde:

R_C = Resistência da rocha ao cisalhamento (Pa).

R_p = Resistência à compressão da rocha (Pa).

A_C = Área de contato entre rocha/cortador (m²).

A_w = Área plana relativa a região de desgaste (m²).

Aplicando os valores de F_{fc} e F_{fw} das Equações A.6 e A.7 nas Equações A.1, A.2 e A.3 são obtidas as Equações A.8, A.9 e A.10:

$$F_H = F_C \text{cos} \alpha \text{cos} \beta - \mu F_C \text{sen} \alpha \text{cos} \beta + \mu F_w \quad (A.8)$$

$$F_S = F_C \text{cos} \alpha \text{sen} \beta - \mu F_C \text{sen} \alpha \text{sen} \beta \quad (A.9)$$

$$F_N = F_C \operatorname{sen} \alpha + \mu F_C \operatorname{cos} \alpha + F_w \quad (\text{A.10})$$

As Equações A.8, A.9 e A.10 fornecem as Equações A.11, A.12 e A.13:

$$F_C - \mu F_C \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_H - \mu F_w}{\operatorname{cos} \alpha \operatorname{cos} \beta} \quad (\text{A.11})$$

$$F_C - \mu F_C \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_S}{\operatorname{cos} \alpha \operatorname{sen} \beta} \quad (\text{A.12})$$

$$F_C + \mu F_C \operatorname{cotg} \alpha = \frac{F_N - F_w}{\operatorname{sen} \alpha} \quad (\text{A.13})$$

Isolando $\mu * F_C$ na Equação A.13, chega-se na Equação A.14:

$$\mu F_C = \frac{F_N - F_w}{\operatorname{cos} \alpha} - F_C \operatorname{tg} \alpha \quad (\text{A.14})$$

A substituição da Equação A.14 na Equação A.11 tem como resultado a Equação A.15:

$$F_C - \frac{F_N - F_w}{\operatorname{cos} \alpha} \operatorname{tg} \alpha + F_C \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{F_H - \mu F_w}{\operatorname{cos} \alpha \operatorname{cos} \beta} \quad (\text{A.15})$$

Rearranjando a Equação A.15 tem-se a Equação A.16:

$$F_C = \frac{F_H + F_N \operatorname{tg} \alpha \operatorname{cos} \beta - F_w (\mu + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{cos} \beta)}{\operatorname{cos} \alpha \operatorname{cos} \beta (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)} \quad (\text{A.16})$$

Da substituição da Equação A.8 na Equação A.16 obtém-se a Equação A.17:

$$F_C = \frac{F_N - F_w}{\operatorname{sen} \alpha + \mu \operatorname{cos} \alpha} \quad (\text{A.17})$$

Assumindo que o cortador PDC seja novo ou que o desgaste seja insignificante, então $F_w = 0$. Nesse caso, conhecendo a Força normal F_N que o cortador é submetido, a Força de corte real F_C pode ser determinada pela Equação A.18:

$$F_C = \frac{F_N}{\operatorname{sen}\alpha + \mu\operatorname{cos}\alpha} \quad (\text{A.18})$$

A substituição da Equação A.5 na Equação A.8 transforma-se na Equação A.19:

$$F_H = F_C \operatorname{cos}\beta (\operatorname{cos}\alpha - \mu\operatorname{sen}\alpha) + \mu R_p A_w \quad (\text{A.19})$$

Substituindo a Equação A.17 na Equação A.19 chega-se na Equação A.20:

$$F_H = \left(\frac{F_N - R_p A_w}{\mu\operatorname{cos}\alpha + \operatorname{sen}\alpha} \right) \operatorname{cos}\beta (\operatorname{cos}\alpha - \mu\operatorname{sen}\alpha) + \mu R_p A_w \quad (\text{A.20})$$

A Equação A.21 é uma simplificação da Equação A.20:

$$F_H = F_N \frac{\operatorname{cos}\beta (1 - \mu\operatorname{tg}\alpha)}{\mu + \operatorname{tg}\alpha} - R_p A_w \frac{\operatorname{cos}\beta (1 - \mu\operatorname{tg}\alpha)}{\mu + \operatorname{tg}\alpha} + \mu R_p A_w \quad (\text{A.21})$$

Caso não haja desgaste no cortador PDC, o valor de A_w é nulo, então a Equação A.21 é simplificada para a Equação A.22:

$$F_H = F_N \operatorname{cos}\beta \frac{(1 - \mu\operatorname{tg}\alpha)}{(\mu + \operatorname{tg}\alpha)} \quad (\text{A.22})$$

A Equação A.22 é o resultado do modelo de Rajabov et al. (2012) para a definição da força horizontal num cortador PDC com os valores conhecidos da força normal, do ângulo de ataque, do ângulo de saída lateral e do coeficiente de atrito μ ,

considerando a geometria da ferramenta em três dimensões. Caso o ângulo de saída lateral seja nulo, a Equação A.22 assumirá a forma da Equação A.23:

$$F_H = F_N \frac{(1 - \mu \operatorname{tg} \alpha)}{(\mu + \operatorname{tg} \alpha)} \quad (\text{A.23})$$

A Equação A.23 é semelhante ao do modelo desenvolvido por Kuru e Wojtanowicz (1988). Surgiram algumas inconsistências nos primeiros testes entre o coeficiente de atrito e o ângulo de ataque, mesmo para situações onde a superfície de contato da rocha com o cortador não variavam. Para eliminar o problema foi adicionado o coeficiente C , que ajusta o coeficiente de atrito para gerar o mesmo valor para todos os ângulos de ataque. Com a adição do novo coeficiente, a Equação A.22 assume a forma da Equação A.24 (KURU; WOJTANOWICZ, 1988; RAJABOV et al., 2012):

$$F_H = F_N \cos \beta \frac{(C - \mu \operatorname{tg} \alpha)}{(\mu + C \operatorname{tg} \alpha)} \quad (\text{A.24})$$

APÊNDICE B - ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA

Dado um processo físico, no qual, p seja o número de variáveis dimensionais na Equação B.1, e m seja o número mínimo de dimensões básicas necessárias para descrever as variáveis, então a equação pode ser reduzida para o valor de $p - m$ variáveis (WHITE, 2011):

$$\pi_1 = G_1(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{p-m}) \quad (\text{B. 1})$$

Pode-se exemplificar esta situação considerando a força de arrasto F que age sobre a esfera estacionária. Os parâmetros importantes para análise são: o diâmetro da esfera D , a velocidade do fluido V , a massa específica do fluido ρ além da sua viscosidade μ . A força de arrasto é escrita na forma da Equação B.2:

$$F = f(D, V, \rho, \mu) \quad (\text{B. 2})$$

A análise dimensional permite que, realizando algumas operações matemáticas, seja possível encontrar a dependência de F em relação à D, V, ρ e μ (Equação B.3):

$$\frac{F}{\rho V^2 D^2} = f_1\left(\frac{\rho V D}{\mu}\right) \quad (\text{B. 3})$$

Segundo Fox e McDonald (2001), o método *Pi de Buckingham* foi proposto em 1914 e mostra como encontrar os grupos de π que compõem as relações entre as variáveis. Cada grupo é independente e será produto de potências destas $(p - m)$ variáveis. Usando o exemplo da força de arrasto sobre a esfera, tem-se o total de $p = 5$ variáveis (F, D, V, ρ e μ) que são decompostas em razão $m = 3$ grandezas primárias (MLt). Nesse caso, é possível a obtenção de dois grupos adimensionais (5-3) que para esse exemplo são: $\pi_1(C_f)$ e $\pi_2(\text{Re})$.

Os sete passos para a determinação dos grupos adimensionais são descritos no roteiro a seguir (FOX; MCDONALD, 2001):

- a/ Determinação de todas as variáveis p que estão envolvidas no problema;
- b/ Selecionar o conjunto de dimensões primárias básicas. As variáveis analisadas podem ser decompostas em função de MLt ou FLt . Para casos que envolvam transferência de calor ou em sistemas elétricos, pode ser necessário adicionar a temperatura T e a carga elétrica q , respectivamente;
- c/ Listar todos os parâmetros envolvidos em função das dimensões primárias, sendo m o número de dimensões primárias;
- d/ Calcular a quantidade de números adimensionais ($p - m$);
- e/ Escolher as variáveis de repetição entre as p variáveis do problema. As variáveis escolhidas devem incluir todas as dimensões básicas e não podem ser iguais. No exemplo da força de arrasto sobre a esfera, os parâmetros ρVD podem ser uma boa escolha;
- f/ Estabelecer as equações para cada grupo adimensional, elevando as variáveis de repetição em expoentes desconhecidos (a , b e c), para o exemplo já mencionado da força de arrasto chega-se as Equações B.4 e B.5:

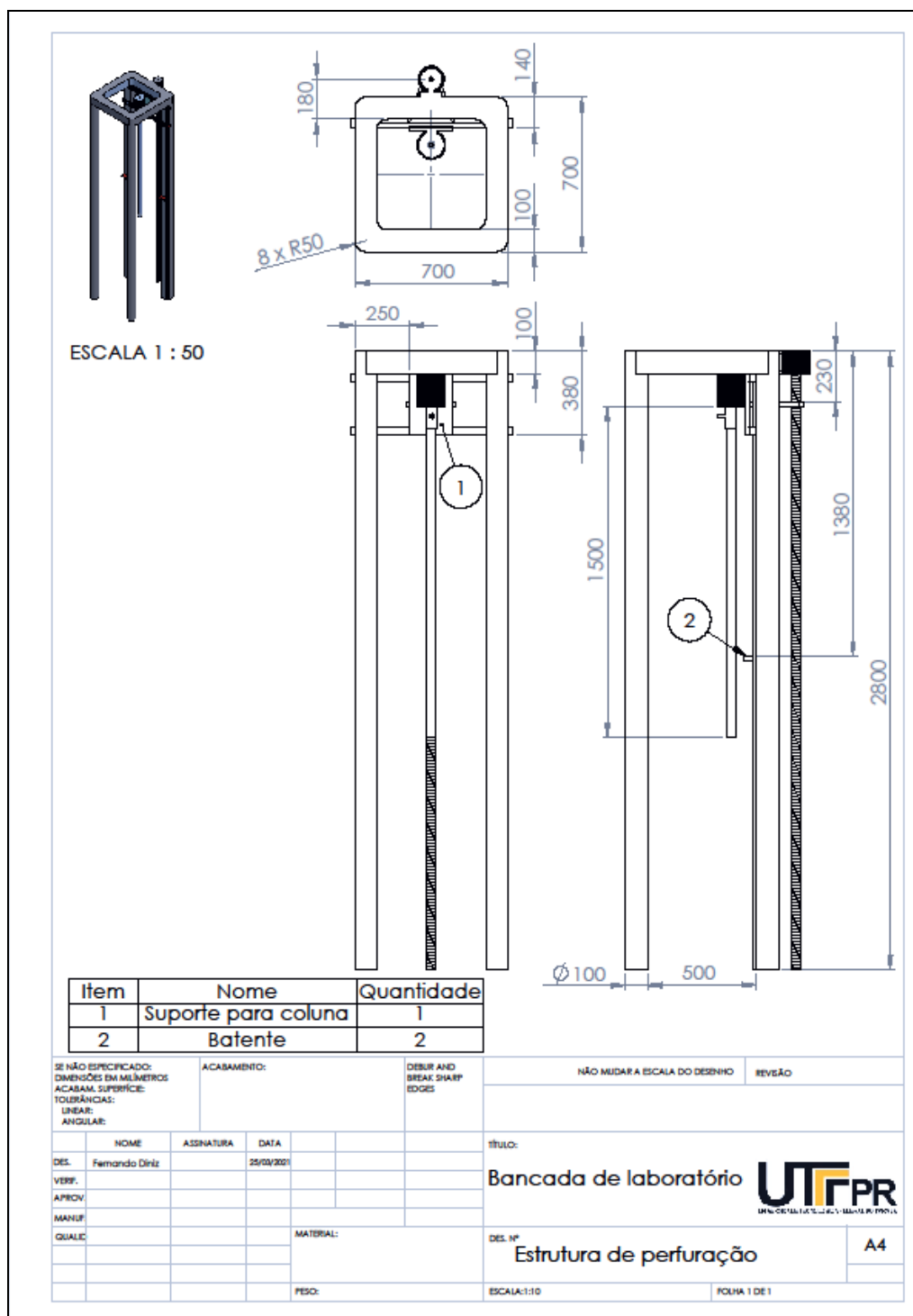
$$\pi_1 = F\rho VD \text{ ou } \left(\frac{ML}{t^2}\right) \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c = M^0 L^0 t^0 \quad (B.4)$$

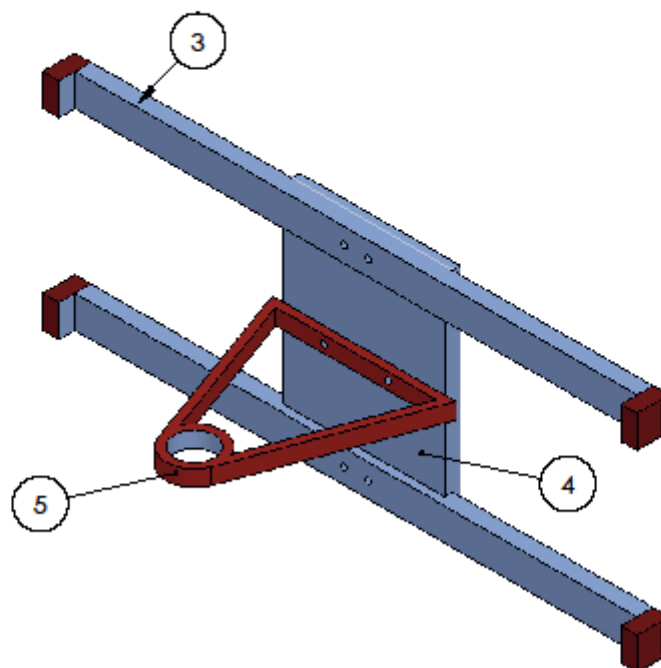
$$\pi_2 = \mu\rho VD \text{ ou } \left(\frac{M}{Lt}\right) \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c = M^0 L^0 t^0 \quad (B.5)$$

- g/ Validar os valores dos expoentes encontrados e verificar se os grupos π resultantes são realmente adimensionais.


APÊNDICE C – DESENHOS DA BANCADA

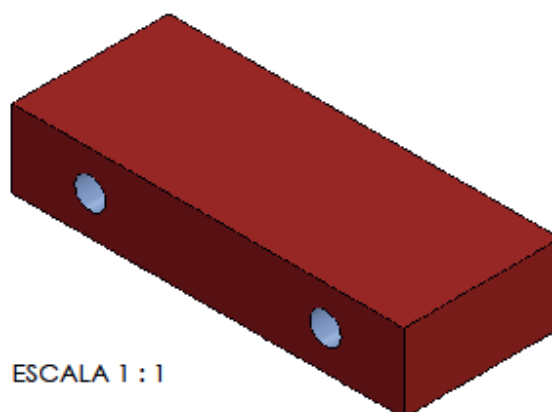
Este apêndice apresenta os desenhos do projeto conceitual da bancada. As dimensões geométricas dos itens comerciais, como os motores, não são contempladas nesta fase do projeto. Todos os desenhos são cotados em milímetros.



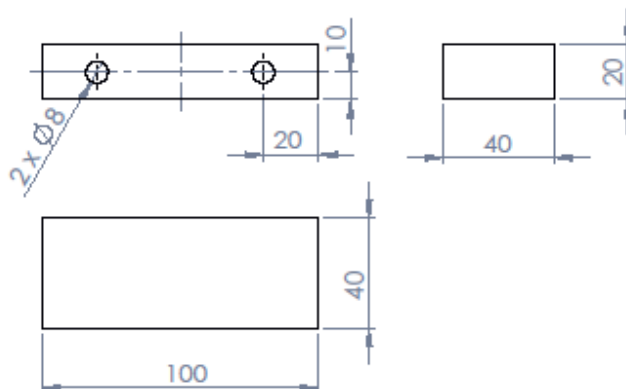



Item	Nome	Quantidade
3	Suporte para base	2
4	Base retangular	1
5	Alça do suporte	1

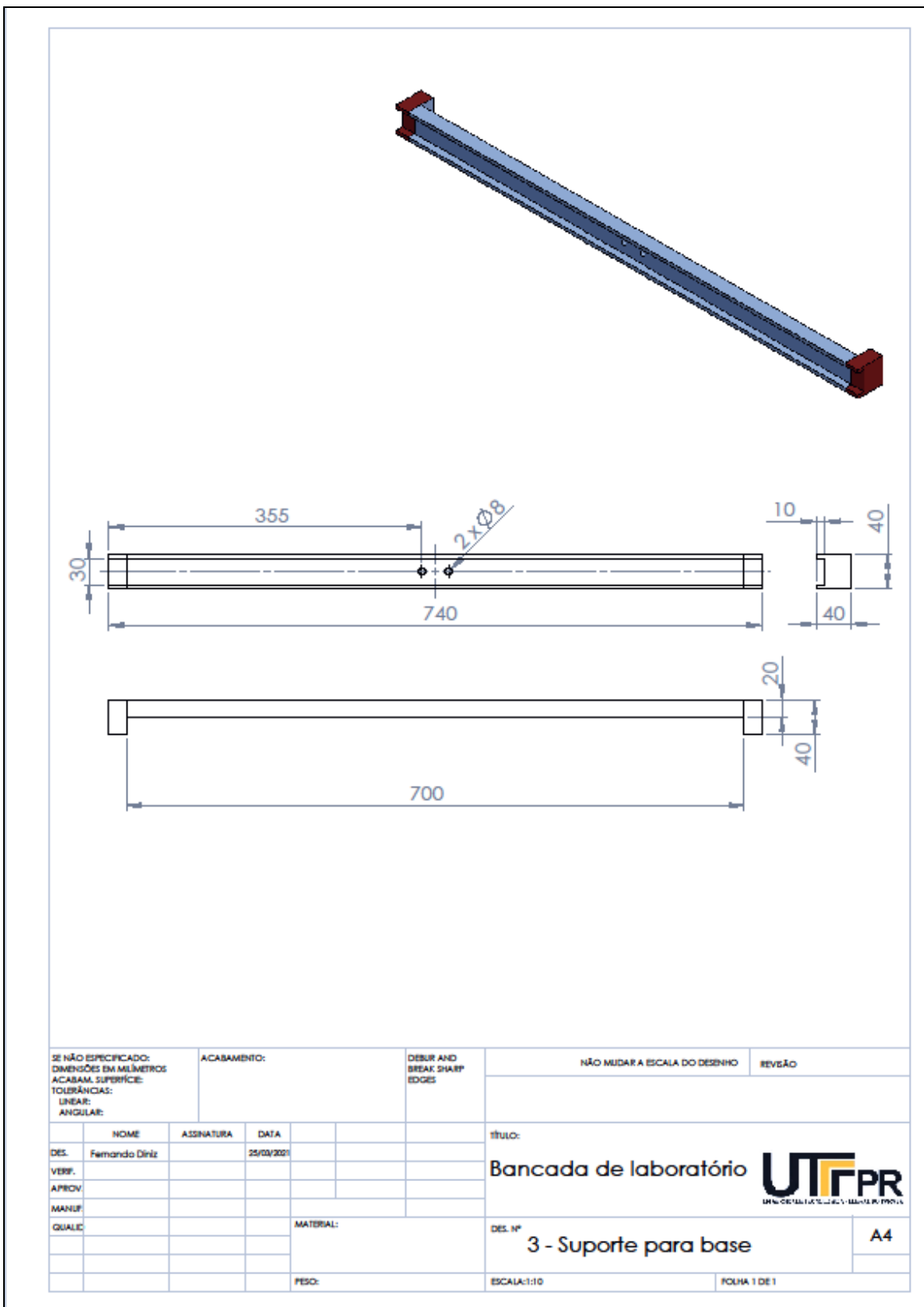
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:	DESUR AND BREAK SHARP EDGES	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:	
DES. Fernando Diniz		25/03/2021			Bancada de laboratório	
VERIF.						
APROV.						
MANUF.					DES. Nº	
QUALIC.				MATERIAL:	1 - Suporte para coluna	
				PESO:	ESCALA:1:10	FOLHA 1 DE 1
						A4




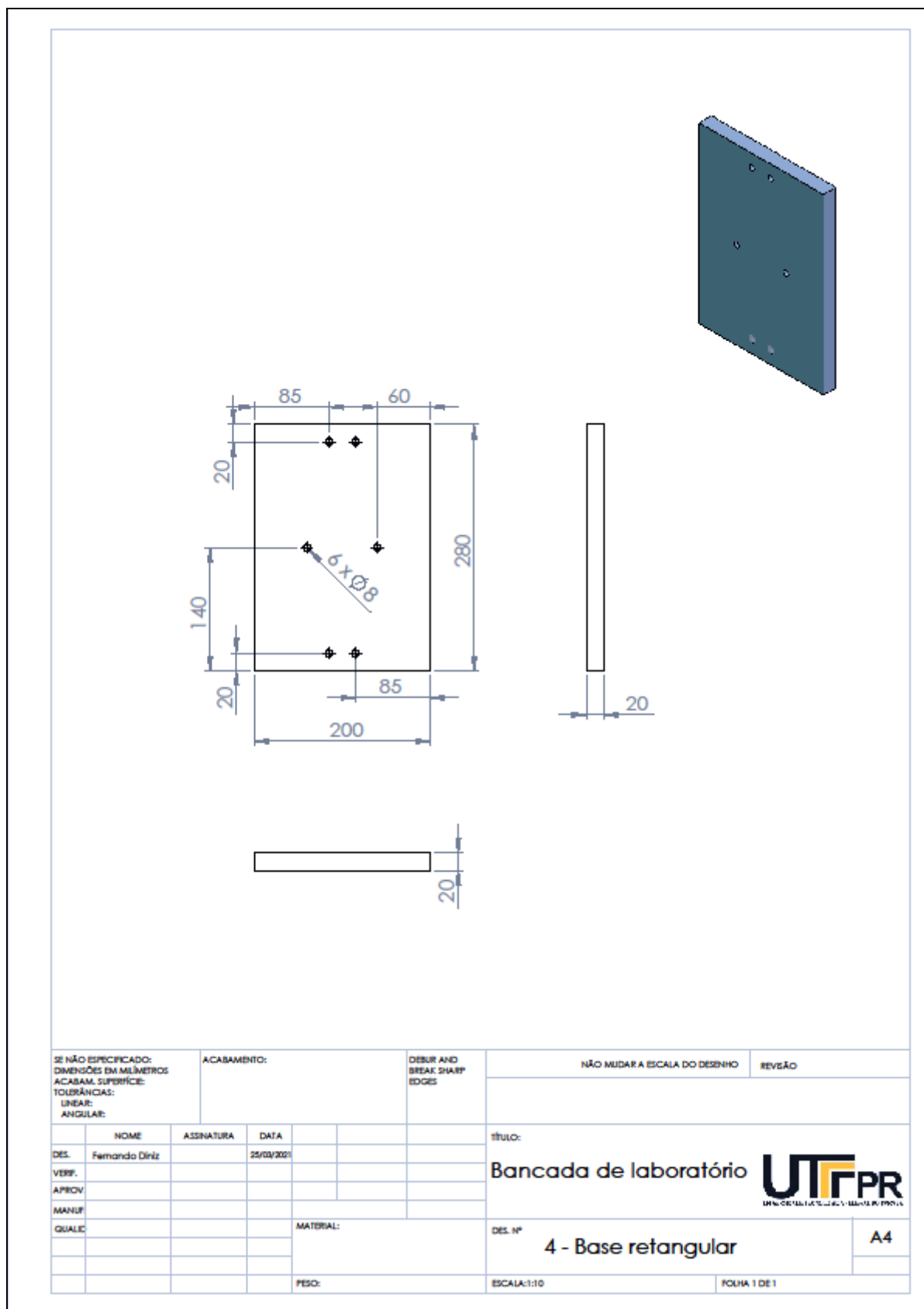
ESCALA 1 : 1

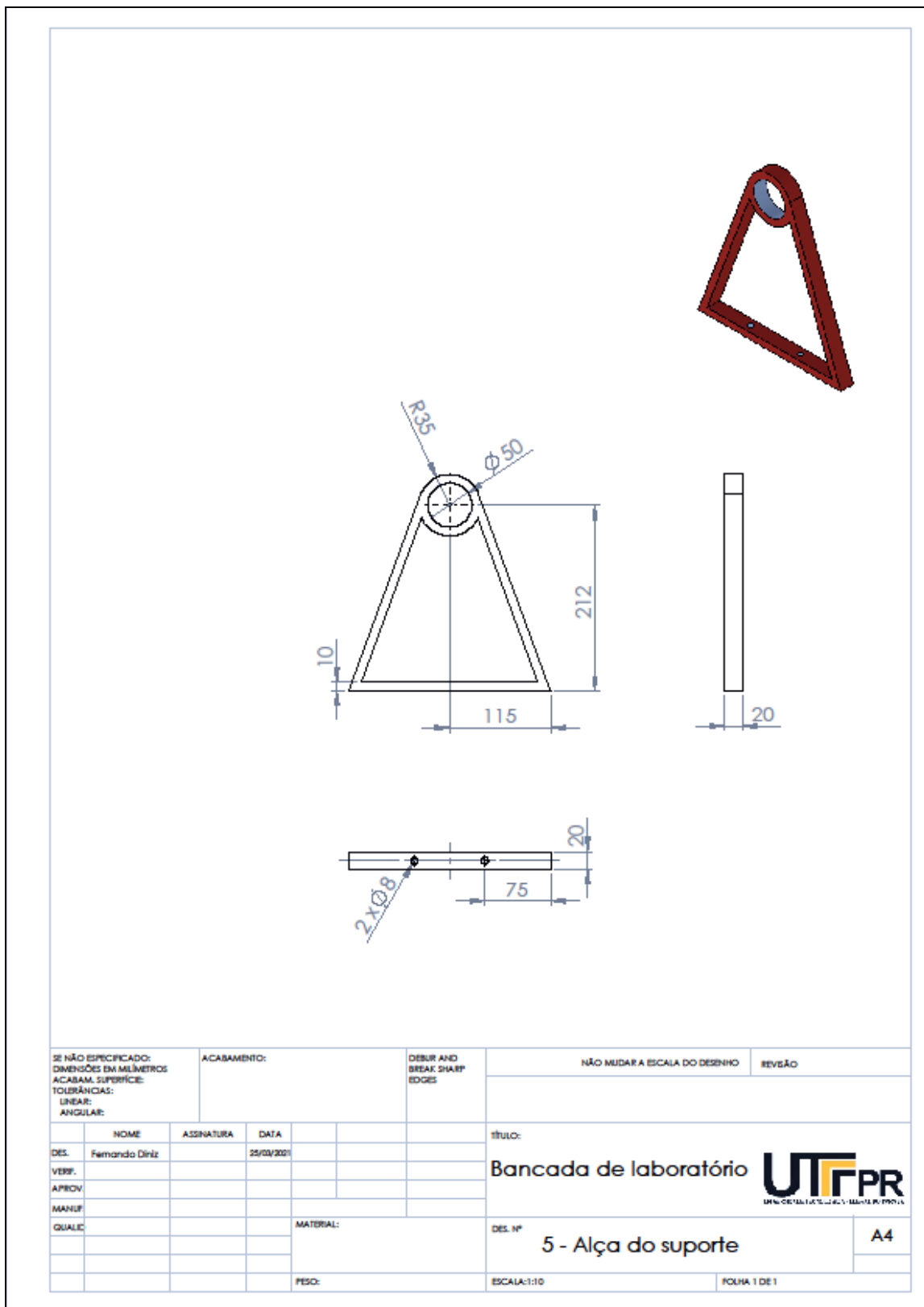



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVEÃO
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:	
VERIF.	Fernando Diniz		25/02/2021			Bancada de laboratório	
APROV.							
MANUF.						DES. Nº	A4
QUALIC.				MATERIAL:		2 - Batente	
				PESO:		ESCALA:1:10	FOLHA 1 DE 1

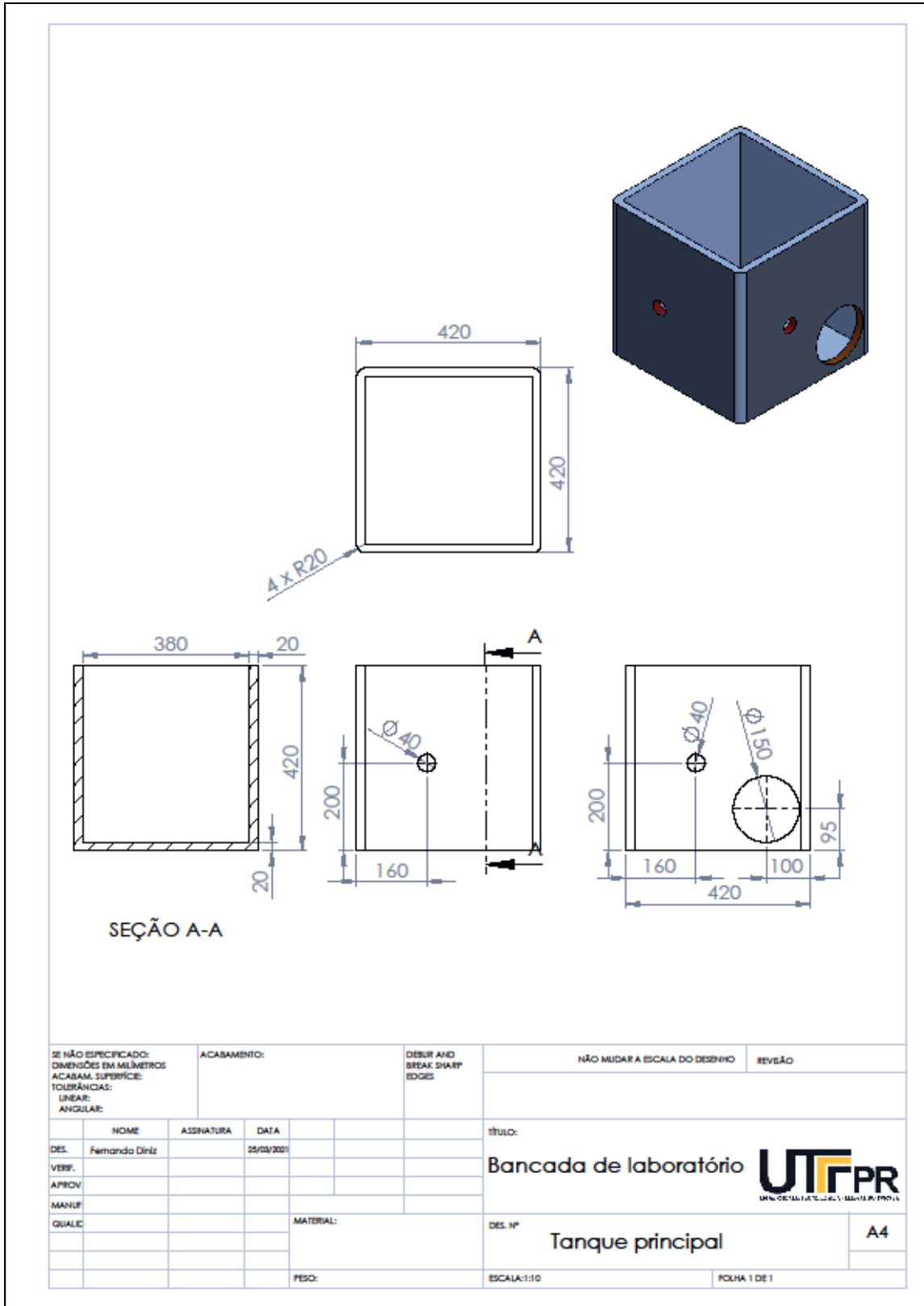


SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVEÃO
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA		título:	
VERF.	Fernando Diniz		25/02/2021		Bancada de laboratório	
APROV.						
MANUF.					DES. Nº	A4
QUALIC.				MATERIAL:	3 - Suporte para base	
				PESO:	ESCALA:1:10	FOLHA 1 DE 1

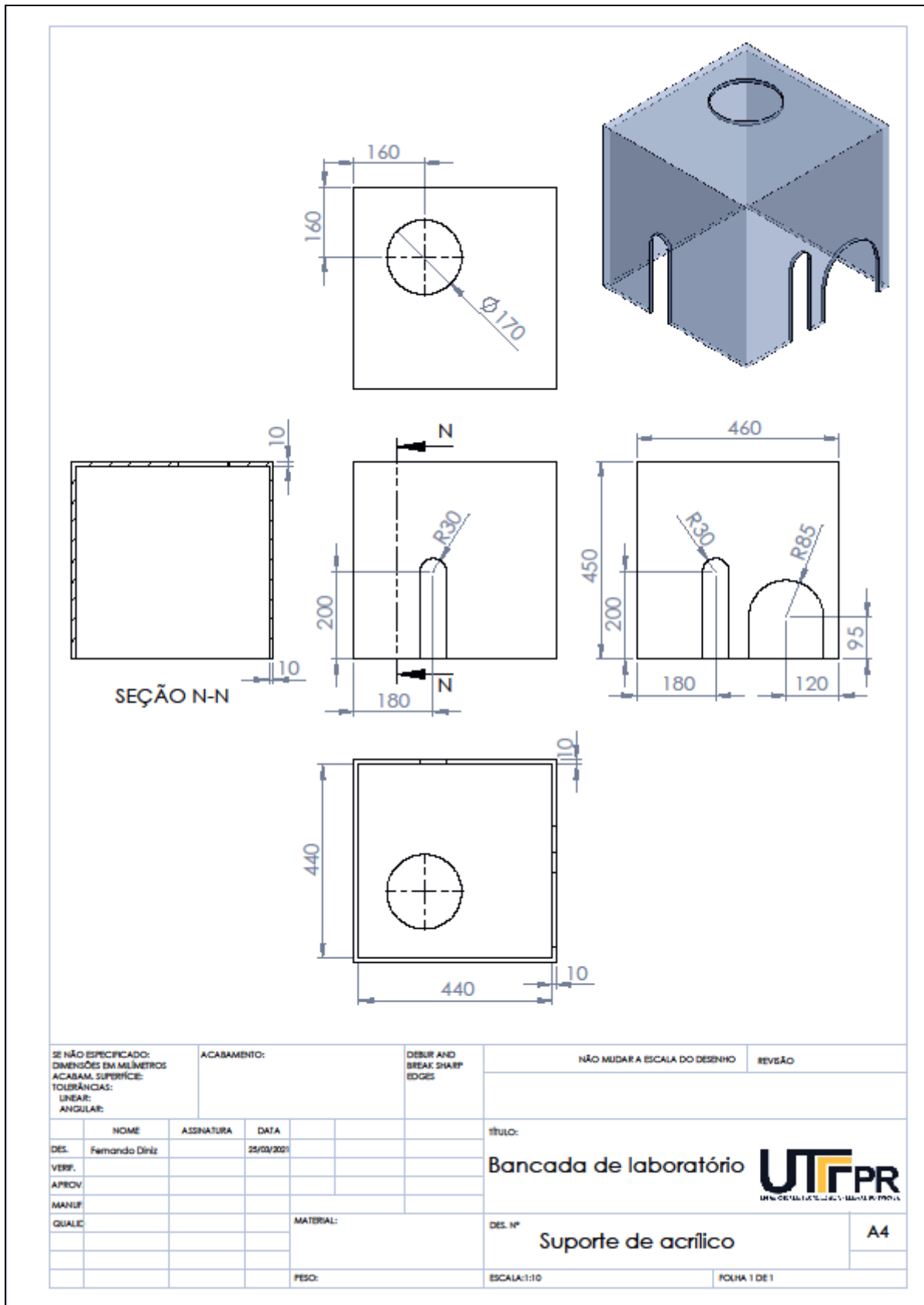





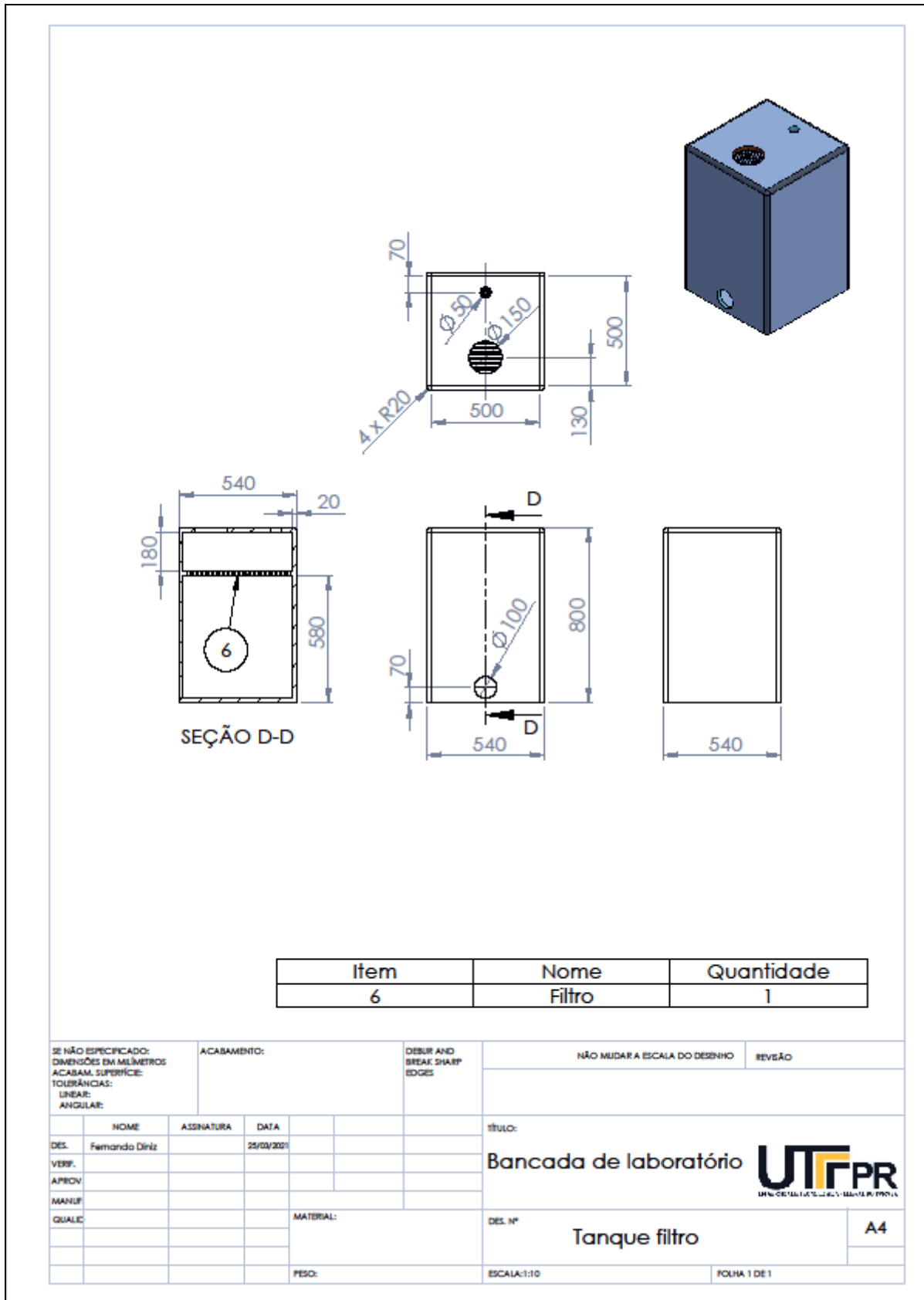
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME			ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES. Fernando Diriz					25/03/2021		Bancada de laboratório			
VERIF.										
APROV.										
MANUF.							DES. Nº			
QUALC.							5 - Alça do suporte			
							MATERIAL:			
							PESO:			
							ESCALA:1:10			
							FOLHA 1 DE 1			
							A4			




SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVERSÃO		
							TÍTULO:				
							Bancada de laboratório				
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA					DES. Nº		A4	
VERIF.	Fernando Diniz		25/03/2021					Tanque principal			
APROV.								ESCALA: 1:10		FOLHA 1 DE 1	
MANUF.											
QUALIC				MATERIAL:							
				PESO:							

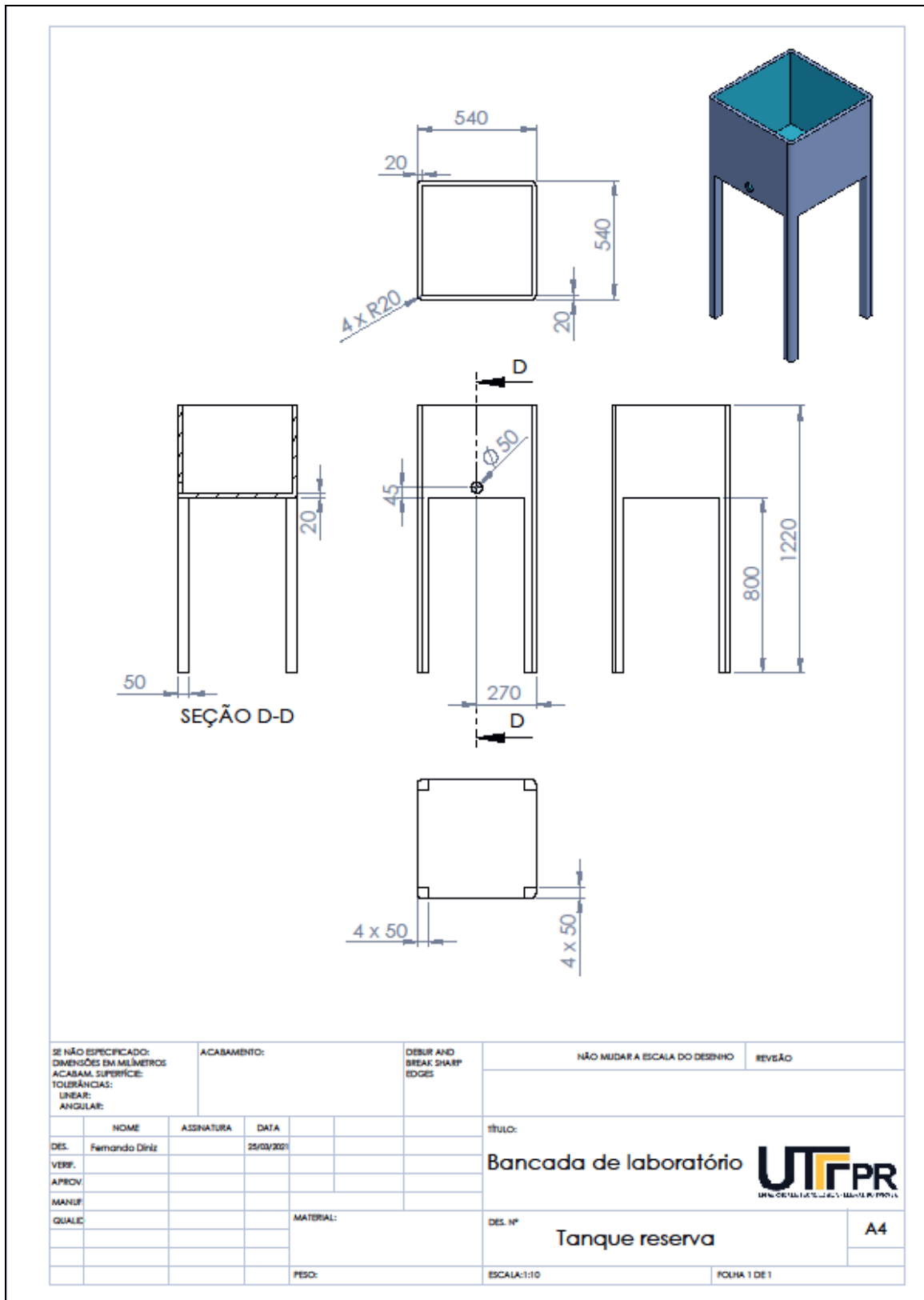



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:	DESUR AND BREAK SHARP EDGES	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVISÃO																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOME</th> <th>ASSINATURA</th> <th>DATA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DES.</td> <td>Fernando Diniz</td> <td></td> <td>25/03/2021</td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROV.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MANUF.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>QUALIC.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					NOME	ASSINATURA	DATA	DES.	Fernando Diniz		25/03/2021	VERIF.				APROV.				MANUF.				QUALIC.				TÍTULO: Bancada de laboratório		
	NOME	ASSINATURA	DATA																											
DES.	Fernando Diniz		25/03/2021																											
VERIF.																														
APROV.																														
MANUF.																														
QUALIC.																														
MATERIAL:				DES. Nº Suporte de acrílico		A4																								
FESO:				ESCALA:1:10		FOLHA 1 DE 1																								



Item	Nome	Quantidade
6	Filtro	1

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.	Fernando Diniz	ASSINATURA		DATA	25/03/2021	TÍTULO: Bancada de laboratório			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.						DES. Nº		A4	
QUALIC.						MATERIAL:		Tanque filtro	
						PESO:		ESCALA: 1:10	
								FOLHA 1 DE 1	



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
							TÍTULO:			
DES. Fernando Diniz			ASSINATURA		DATA 25/05/2021		Bancada de laboratório			
VERIF.										
APROV.										
MANUF.										
QUALI:							DES. Nº		A4	
							Tanque reserva			
							ESCALA: 1:10		FOLHA 1 DE 1	