



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS ALBERTO LIMA MATOS

INOVAÇÕES NA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO:
INTEGRAÇÃO DA UNIDADE DE CIMENTAÇÃO PARA OPERAÇÕES
DE TAMPONAMENTO E SQUEEZE DE POÇOS DE PETRÓLEO

Campina Grande
2024

LUCAS ALBERTO LIMA MATOS

**INOVAÇÕES NA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO: INTEGRAÇÃO DA
UNIDADE DE CIMENTAÇÃO PARA OPERAÇÕES DE TAMPONAMENTO E
SQUEEZE DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Campina Grande

2024

LUCAS ALBERTO LIMA MATOS

**INOVAÇÕES NA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO: INTEGRAÇÃO DA
UNIDADE DE CIMENTAÇÃO PARA OPERAÇÃO DE TAMPONAMENTO E
SQUEEZE DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Ricardo Soares Gomez
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Me. Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo
Universidade Maurício de Nassau

Campina Grande, Maio de 2024.

Dedico esse trabalho à minha mãe Luciane, e meu irmão Luís André, pela força em todos os momentos, vocês foram a minha maior motivação ao longo dessa jornada. A Michelle, minha parceira para a vida, que desde antes da graduação esteve ao meu lado em todos os momentos. Aos meus tios, primos e avós pelo incentivo e apoio constantes. Ao meu pai Luís Alberto (in memoriam), o farol que me guia em meio a tempestade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao corpo docente da Universidade Federal de Campina Grande, que sempre transmitiu seu saber com muito profissionalismo, em especial ao professor Marcelo Grilo, seu comprometimento com a formação de qualidade e sua paixão pelo ensino foram uma grande inspiração para mim. Aos meus colegas de curso, pela oportunidade do convívio e pela cooperação mútua durante estes anos.

Estendo meus agradecimentos ao Márcio Barreto, responsável pela minha seleção junto a BRASERV Petróleo, e também sou grato pela confiança depositada em mim para liderar o projeto que deu origem a este trabalho. Aos meus colegas de trabalho Ananda, Antônio e Gilcemar, e à equipe de manutenção que esteve comigo durante o processo que levou a este trabalho, em especial ao Geovane e ao João Freire, pelo conhecimento que me passaram, e ao Mateus que integrou a equipe desde o primeiro dia.

Ao professor Wanderley Amorim, por mostrar que entender a pergunta e saber onde procurar a resposta é tão importante quanto responder. Todos que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho. Agradeço a todos que não foram citados nominalmente, mas que de alguma forma contribuíram com a elaboração deste trabalho.

“Na Engenharia 99% feito é igual a 0, faça as coisas 100% para que se considere concluídas.”

(Ricardo Guidini)

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento da primeira Unidade de Cimentação da BRASERV Petróleo LTDA, (UC-01) para operações de tamponamento e squeeze em poços de petróleo, com foco nas necessidades da empresa BRASERV Petróleo LTDA. Inicialmente, discute-se a importância do ciclo de vida dos poços produtores e a complexidade da avaliação financeira de sua viabilidade ao longo do tempo. Os objetivos geral e específicos do projeto são delineados, abrangendo desde a revisão da literatura até a avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental da UC-01. A metodologia para desenvolvimento da UC-01 baseia-se na técnica de integração aplicada, categorizando os componentes em compra, adaptação, cópia e desenvolvimento. A UC-01, equipada com sistemas de bombeamento, mistura e transporte pneumático, foi desenvolvida integrando componentes adquiridos externamente e desenvolvidos internamente. A estratégia de compra direta foi utilizada para componentes complexos, enquanto adaptações foram feitas quando necessário. A cópia de um agitador e o desenvolvimento interno de componentes específicos demonstraram compromisso com soluções de alta qualidade e personalizadas. Os resultados demonstram a eficiência e confiabilidade da UC-01 em sua aplicação prática, refletindo o compromisso da BRASERV com a excelência e inovação em suas operações. A UC-01 não apenas atende às expectativas de desempenho, confiabilidade e eficiência, mas também promove a segurança operacional, a proteção ambiental e a competitividade da indústria petrolífera. Este trabalho contribui significativamente para o avanço tecnológico e fortalecimento da posição da BRASERV como líder no setor.

Palavras-chave: Unidade de Cimentação, Tamponamento, Poços de Petróleo, Integração Aplicada.

ABSTRACT

This paper presents the development of the first BRASERV's Cementing Unit (UC-01) for plugging and squeezing operations in oil wells, focusing on the needs of BRASERV Petróleo LTDA. Initially, the importance of the life cycle of producing wells and the complexity of evaluating their financial viability over time are discussed. The general and specific objectives of the project are outlined, ranging from literature review to the assessment of the technical, economic, and environmental viability of UC-01. The methodology adopted of the development of UC-01 is based on the applied integration technique, categorizing components into purchase, adaptation, copy, and development. UC-01, equipped with pumping, mixing, and pneumatic transport systems, was developed by integrating externally acquired and internally developed components. The direct purchase strategy was used for complex components, while adaptations were made as necessary. Copying an agitator and internally developing specific components demonstrated a commitment to high-quality and customized solutions. The results demonstrate the efficiency and reliability of UC-01 in practical application, reflecting BRASERV's commitment to excellence and innovation in its operations. UC-01 not only meets performance, reliability, and efficiency expectations but also promotes operational safety, environmental protection, and competitiveness in the oil industry. This work significantly contributes to technological advancement and strengthens BRASERV's position as a leader in the sector.

Key Words: Cementing Unit, Plugging, Oil Wells, Applied Integration.

LISTA DE ABREVIACES

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gs Natural e Biocombustíveis
API	American Petroleum Institute
CSB	Conjuntos Solidrios de Barreiras
ISO	International Organization for Standardization
UCs	Unidades de Cimentaco
SLB	Schlumberger Limited

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cimentação Primária.....	17
Figura 2 - Cimentação Secundária.....	19
Figura 3 – Colunas de Revestimento	20
Figura 4 - Compressão do Cimento ou Squeeze	22
Figura 5 – Unidade de Cimentação CPF-377.....	33
Figura 6 – Batch-mixer	34
Figura 7 – Caminhão Transportador de Cimento em Pó.....	35
Figura 8 - Fluxograma Metodológico do Desenvolvimento da Unidade de Cimentação	39
Figura 9 - Fluxo de Decisão para Confeção de Componentes.....	41
Figura 10 – Vista Superior do Primeiro Layout Pensado para a UC-01.....	42
Figura 11 – Vista Lateral do Primeiro Layout Pensado para a UC-01.....	42
Figura 12 – Ensaio do Posicionamento dos Equipamentos Sobre a Prancha.....	43
Figura 13 - Esquema Inicial do Subsistema de Mistura da Unidade de Cimentação 01	44
Figura 14 – Unidade de Bombeio Offshore Montada Sobre Skid.....	44
Figura 15 – Posicionamento Final dos Equipamentos Sobre a Prancha.....	45
Figura 16 - Fluxograma dos Sistemas da Unidade de Cimentação 01 e seus Componentes.....	47
Figura 17 - Motor Diesel V8.....	48
Figura 18 - Caixa de Marchas	49
Figura 19 - Eixo Cardan	49
Figura 20 - Bomba Triplex.....	50
Figura 21 - Motor Diesel 6.6L.....	51
Figura 22 - Bombas Hidráulicas Já Anexadas Pelo Slot de Expansão	52
Figura 23 – Bomba de Engrenagens.....	53
Figura 24 - Motores Hidráulicos de Pistões e Orbital	54
Figura 25 - Válvula Reguladora de Vazão.....	54
Figura 26 - Tanque de Mistura	55
Figura 27 - Tanque de Deslocamento	56
Figura 28 - Bomba Centrífuga.....	57

Figura 29 – Mancal do Agitador.....	57
Figura 30 – Haste do Agitador, BM-01 (Esquerda), e UC-01 (Direita)	58
Figura 31 – Compressor de Ar	58
Figura 32 - Silo de Cimento.....	60
Figura 33 - Balão de Derivação.....	60
Figura 34 - Unidade de Cimentação UC-01 Finalizada	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	13
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	ABANDONO DE POÇOS DE PETRÓLEO	15
2.2	CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO	16
2.2.1	<i>Cimentação Primária</i>	16
2.2.2	<i>Cimentação Secundária</i>	18
2.2.3	<i>Revestimento</i>	20
2.2.4	<i>Compressão do Cimento (Squeeze)</i>	21
2.2.5	<i>Tamponamento Dos Poços</i>	22
2.3	TAMPONAMENTO PARA ABANDONO DE POÇOS	23
2.3.1	<i>Procedimentos Para Abandono Temporário e Permanente</i>	24
2.3.2	<i>Desafios e Aspectos do Tamponamento</i>	25
2.4	REGRAS E NORMAS	26
2.5	OPERAÇÃO DE SQUEEZE	27
2.5.1	<i>Procedimento e tipos de squeeze</i>	28
2.5.2	<i>Processo de Execução do Squeeze</i>	29
2.6	DEMANDA DE TAPONAMENTO DE POÇOS	29
2.7	UNIDADE DE CIMENTAÇÃO	30
2.7.1	<i>Unidades de Cimentação Modernas</i>	32
2.7.2	<i>Unidade de Cimentação Modular</i>	33
2.7.3	<i>Unidade de Cimentação BRASERV UC-01</i>	35
2.7.4	<i>Equipe de Construção UC-01</i>	37
3	METODOLOGIA	39
4	RESULTADOS	42
4.1	BRASERV UC-01 UNIDADE DE CIMENTAÇÃO COMPACTA	42
4.1.1	<i>Subsistema 1: Sistema de Bombeio</i>	48
4.1.2	<i>Subsistema 2: Sistema Hidráulico</i>	50
4.1.3	<i>Subsistema 3: Sistema De Mistura</i>	55
4.1.4	<i>Subsistema 4: Sistema Pneumático</i>	59
4.2	MATRIZ DE INTEGRAÇÃO DOS PROCESSOS	61
4.2.1	<i>Compra</i>	61
4.2.2	<i>Adaptação</i>	62
4.2.3	<i>Cópia</i>	63
4.2.4	<i>Desenvolvimento</i>	63

4.3	RESULTADO FINAL	65
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Na indústria petrolífera, o ciclo de vida dos poços produtores é um elemento fundamental que norteia as atividades de extração e produção de petróleo. Desde as fases iniciais de estudo da geologia da região até o momento do descomissionamento, uma série de etapas são meticulosamente conduzidas. Isso inclui a perfuração, produção, desenvolvimento e manutenção dos poços, cada uma demandando investimentos substanciais, não apenas na fase inicial de mobilização, mas ao longo de todo o seu ciclo operacional (Furtado, 2018).

À medida que um poço envelhece, é inevitável que sua produção de petróleo diminua gradualmente, enquanto os custos de manutenção aumentam. Essa dinâmica torna imperativo uma avaliação contínua da viabilidade financeira do poço. No entanto, estimar o momento exato em que um poço se torna financeiramente inviável é uma tarefa complexa devido à multiplicidade de variáveis envolvidas, como as flutuações no preço do petróleo, a possibilidade de compartilhamento de recursos entre poços vizinhos e a consideração de possíveis estratégias de abandono temporário (Araújo, 2020).

O processo de abandono de um poço é regido por regulamentações rigorosas, visando garantir não apenas a segurança e integridade do próprio poço, mas também a proteção do meio ambiente. No Brasil, os procedimentos de descomissionamento seguem as diretrizes estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), conforme estipulado na Portaria nº 46 de 01/11/2016.

Com o envelhecimento dos campos de petróleo brasileiros, observa-se um aumento significativo na demanda por operações de abandono de poços. Estimativas fornecidas pela ANP indicam que o descomissionamento representará um movimento financeiro expressivo nos próximos anos, com uma considerável parcela desses recursos direcionada especificamente para o abandono de poços (Furtado, 2018).

Recentemente, verificou-se um interesse crescente em operações de abandono em poços localizados nas bacias Potiguar e Sergipe-Alagoas. Esse aumento na demanda tem impulsionado investimentos significativos em unidades de cimentação, equipamentos cruciais para tais operações. Nesse contexto, a BRASERV PETRÓLEO LTDA, uma empresa estabelecida no setor de petróleo e gás, embarcou no desenvolvimento de sua primeira unidade de cimentação. Este projeto foi

concebido para atender às demandas específicas de operações de cimentação de tampões de abandono e squeeze.

O desenvolvimento dessa unidade de cimentação foi realizado na base em Alagoinhas, Bahia, envolvendo uma colaboração multidisciplinar, abrangendo diversas áreas da engenharia. O objetivo central foi criar um equipamento que fosse compacto, confiável e de fácil operação. Além disso, essa unidade foi projetada para ser ágil o suficiente para enfrentar os desafios das operações em áreas de difícil acesso, enquanto mantém processos de operação e manutenção simplificados, permitindo sua condução por equipes reduzidas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma unidade de cimentação projetada para realizar as operações de tamponamento e squeeze em poços de petróleo para a empresa BRASERV Petróleo LTDA.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar uma revisão da literatura sobre as técnicas de cimentação de poços de petróleo, com foco nas operações de tamponamento e squeeze.
- b) Identificar os principais desafios e necessidades específicas relacionadas à cimentação de tampões de abandono e squeeze em poços de petróleo, levando em consideração as condições geológicas e operacionais variáveis e as necessidades da empresa BRASERV Petróleo LTDA.
- c) Desenvolver um projeto detalhado da unidade de cimentação, considerando requisitos específicos como portabilidade, adaptabilidade a diferentes condições de poços e facilidade de manutenção, garantindo sua capacidade de realizar operações de tamponamento e squeeze de forma eficaz e segura.

1.2 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por operações de abandono em poços de petróleo nas bacias Potiguar e Sergipe-Alagoas evidencia a urgência de soluções eficazes para enfrentar os desafios específicos associados a essas atividades (Araújo, 2020).

Nesse contexto, a necessidade de uma unidade de cimentação própria para a operação de tamponamento e squeeze dos poços da empresa BRASERV Petróleo LTDA surge como uma resposta estratégica para atender às demandas do mercado e garantir a eficiência das operações.

A complexidade do ciclo de vida dos poços produtores, desde sua perfuração até o descomissionamento, ressalta a importância de investir em tecnologias avançadas e práticas sustentáveis para garantir a viabilidade financeira e operacional desses ativos (Souza e Veloso, 2017).

O desenvolvimento de uma unidade de cimentação específica para as operações de tamponamento e squeeze representa uma oportunidade única de posicionamento no setor de cimentação, oferecendo soluções inovadoras e adaptadas às necessidades específicas de seus poços e do mercado em geral.

A colaboração multidisciplinar envolvida no desenvolvimento desse equipamento, que abrange diversas áreas da engenharia, demonstra o esforço e dedicação necessárias no desenvolvimento de um equipamento complexo, composto por diversos sistemas e mecanismos que devem operar com confiabilidade para garantir o sucesso da operação com a segurança de todos os envolvidos.

A implementação dessa unidade de cimentação não apenas atenderá às demandas específicas da indústria petrolífera, mas também contribuirá para o avanço tecnológico das operações de abandono de poços, promovendo a competitividade e o desenvolvimento econômico ambientalmente responsável da indústria.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ABANDONO DE POÇOS DE PETRÓLEO

O processo de exploração de poços de petróleo, que teve início no século XIX, passou por diversas etapas de evolução tecnológica, especialmente no que diz respeito à cimentação dos poços. Inicialmente, a cimentação era realizada de forma precária, resultando em vazamentos e perdas significativas de petróleo e água (BEZERRA, 2006). Somente em 1883, na Califórnia, começou-se a utilizar técnicas mais adequadas de cimentação, marcando o início de um processo contínuo de aprimoramento.

O abandono permanente de poços de petróleo representa a última etapa do ciclo de vida dessas estruturas, sendo realizado quando não há intenção de reentrada futura, seja por motivos operacionais, econômicos ou estratégicos. No Brasil, estima-se que aproximadamente 20.000 poços ainda serão abandonados, considerando os poços perfurados até 2017 e os projetados para o futuro (Furtado, 2018).

A cimentação dos poços de petróleo é um procedimento fundamental para garantir sua estabilidade, estanqueidade e durabilidade, prevenindo vazamentos e assegurando a eficiência da produção de petróleo. Existem dois tipos principais de cimentação: primária e secundária. A cimentação primária visa dar estabilidade estrutural ao poço, e fazer a vedação entre a passagem de fluido e o solo. Já a cimentação secundária é realizada após a cimentação primária, geralmente para corrigir deficiências resultantes de uma cimentação malsucedida (Bezerra, 2006).

O objetivo primordial do abandono permanente é evitar vazamentos não intencionais de fluidos para o meio ambiente e garantir a segurança operacional, por meio do isolamento hidráulico das formações e intervalos permeáveis. Esse isolamento é realizado por meio da formação de Conjuntos Solidários de Barreiras (CSB), visando impedir o fluxo de fluidos da formação para o leito marinho ou outras áreas sensíveis (Furtado, 2018). Nesse contexto, as operações de cimentação secundária desempenham um papel crucial no abandono adequado dos poços de petróleo, incluindo a instalação de tampões de cimento para isolar zonas específicas do poço, recimentação para corrigir falhas na cimentação primária e compressão de cimento para corrigir vazamentos ou falhas locais (Bezerra, 2006).

Além disso, os aditivos desempenham um papel importante no processo de cimentação, otimizando as características da pasta de cimento. A escolha adequada dos aditivos contribui para a eficiência e segurança das operações de cimentação (Bezerra, 2006).

O processo de abandono de poços inclui uma série de etapas, como o corte de revestimentos, cimentação do poço, testes de estanqueidade, entre outros procedimentos, com o intuito de assegurar a integridade estrutural do poço e prevenir vazamentos de fluidos (Furtado, 2018). No entanto, é importante ressaltar que o abandono de poços não é uma atividade prescritiva, mas sim regulamentada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por meio da Resolução nº 46 de 2016 (Furtado, 2018). Esta resolução estabelece os requisitos mínimos que os operadores de contrato devem seguir, com base em melhores práticas da indústria e foco na gestão de riscos. A responsabilidade pelo abandono de poços recai sobre o último operador do contrato, que deve comprovar sua capacidade econômica, inclusive considerando os custos associados ao abandono, como parte do processo de licenciamento (Furtado, 2018).

Portanto, o abandono responsável dos poços de petróleo requer uma atenção especial às operações de cimentação, tanto primárias quanto secundárias, bem como à escolha adequada de aditivos. Essas medidas são essenciais para garantir a segurança ambiental e operacional durante todo o ciclo de vida dos poços.

2.2 CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

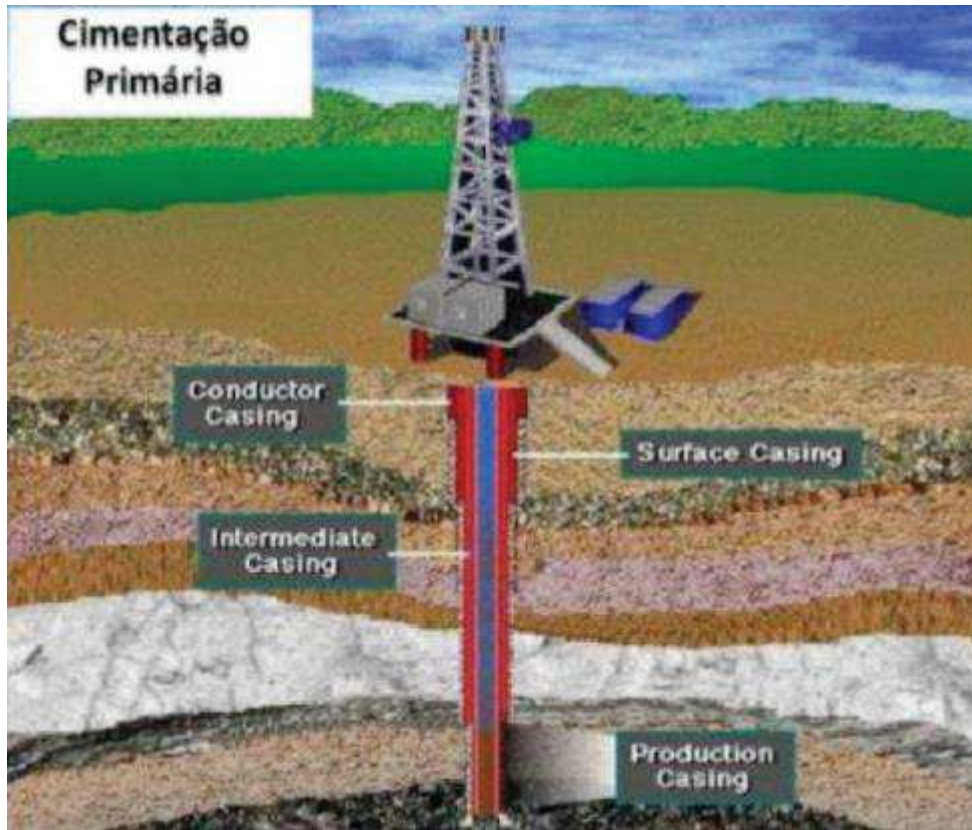
A cimentação de poços de petróleo é um procedimento essencial para garantir a estabilidade, segurança e eficiência operacional dessas estruturas. Existem diversos tipos de procedimentos de cimentação, cada um com seus objetivos específicos, vantagens e desvantagens. Vamos destacar os principais tipos de cimentação e explicar como funcionam.

2.2.1 Cimentação Primária

A cimentação primária (Figura 1) é uma fase do processo de perfuração e conclusão de poços de petróleo. Durante essa etapa, o principal foco é garantir a estabilidade estrutural do poço e prevenir futuros vazamentos. Esse procedimento

ocorre logo após a perfuração inicial e envolve a instalação da tubulação de revestimento (Araújo, 2020).

Figura 1 - Cimentação Primária



Fonte: Couto, 2004.

O processo de cimentação primária começa com a preparação da pasta de cimento, que geralmente é uma mistura de cimento em pó e água, podendo incluir aditivos para melhorar suas propriedades. Esta pasta é então bombeada para o espaço anular entre a parede do poço e a tubulação de revestimento. A injeção da pasta de cimento é realizada de maneira controlada para garantir uma distribuição uniforme ao redor da tubulação (Almeida, Junior e Machado, 2016).

À medida que a pasta de cimento é bombeada, a tubulação de revestimento é abaixada no poço, permitindo que o cimento se espalhe por todo o espaço anular. Essa distribuição uniforme do cimento é essencial para garantir uma vedação eficaz e a estabilidade estrutural do poço (Araújo, 2020).

Uma das principais vantagens da cimentação primária é sua capacidade de prevenir vazamentos e garantir a integridade do poço a longo prazo. Ao vedar o anular entre o poço e a tubulação de revestimento, a cimentação primária cria uma barreira

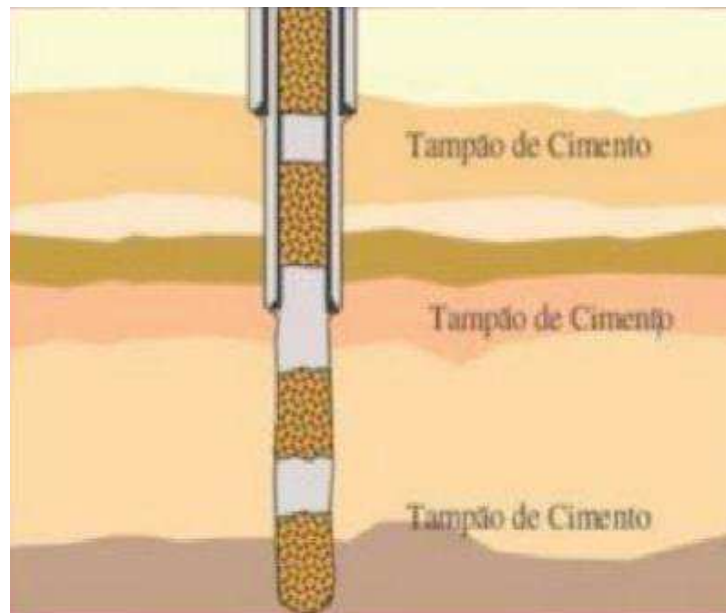
protetora que impede a migração de fluidos indesejados para dentro ou para fora do poço.

No entanto, é importante ressaltar que a cimentação primária também pode apresentar desafios e potenciais desvantagens. Se o processo de cimentação não for executado corretamente, podem surgir falhas que comprometem a integridade do poço. Essas falhas podem resultar em vazamentos, perda de produtividade e até mesmo danos ambientais. Em alguns casos, falhas na cimentação primária podem exigir operações adicionais de cimentação secundária para corrigir os problemas (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Portanto, embora a cimentação primária seja fundamental para garantir a segurança e a eficiência operacional do poço, é essencial que seja realizada com precisão e cuidado para evitar problemas futuros. Isso requer o uso de técnicas avançadas, materiais de alta qualidade e a supervisão de profissionais qualificados em todas as etapas do processo de cimentação.

2.2.2 Cimentação Secundária

A cimentação secundária (Figura 2) é de grande importância na garantia da segurança e eficiência operacional dos poços de petróleo. Esta fase ocorre após a cimentação primária e tem como objetivo corrigir deficiências identificadas durante a inspeção inicial do poço ou melhorar o isolamento entre as formações geológicas. Sua realização é crucial para garantir a integridade estrutural do poço e prevenir vazamentos que possam representar riscos operacionais e ambientais (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

Figura 2 - Cimentação Secundária

Fonte: IOPE, 2010.

Uma das operações comuns durante a cimentação secundária é a recimentação. Este procedimento é realizado para corrigir falhas na cimentação primária, como a altura insuficiente do cimento no anular entre a tubulação de revestimento e a parede do poço. Quando a cimentação primária não atinge a altura desejada ou ocorre uma distribuição inadequada do cimento, isso pode comprometer a eficácia da vedação e a estabilidade do poço.

Durante a recimentação, é necessário acessar a área afetada do poço para aplicar uma nova camada de cimento. Isso geralmente é feito por meio de um processo de canhoneamento, que envolve o uso de equipamentos especializados para perfurar a tubulação de revestimento e permitir o acesso à região onde a recimentação é necessária. Uma vez que a área é acessada, uma nova mistura de cimento é bombeada para o anular, substituindo ou complementando a cimentação primária existente (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

A recimentação é um procedimento crucial para corrigir as deficiências na cimentação primária e garantir a integridade do poço a longo prazo. Ao preencher as lacunas na cimentação existente e garantir uma vedação adequada entre a tubulação de revestimento e a formação rochosa adjacente, a recimentação ajuda a prevenir vazamentos e minimizar os riscos operacionais e ambientais associados à operação do poço (Achang, Yanyao e Radonjic, 2020).

É importante ressaltar que a escolha e execução adequada das operações de cimentação secundária requerem conhecimento técnico especializado e a utilização de equipamentos de alta qualidade. Além disso, esses procedimentos devem ser realizados em conformidade com os regulamentos de segurança e ambientais aplicáveis, garantindo a proteção tanto dos trabalhadores quanto do meio ambiente. Assim, a cimentação secundária desempenha um papel fundamental na garantia da integridade e segurança dos poços de petróleo.

2.2.3 Revestimento

O revestimento trata-se de uma etapa de preparação para garantir que durante a parede de cimento formada após a injeção esteja conforme quanto a espessura e centralização. Nesta etapa, ocorre a inserção de tubos de aço, conhecidos como coluna de revestimento, no poço para servir como guia da pasta de cimento. Espaçadores são conectados na tubulação, para garantir que o revestimento esteja satisfatoriamente centrado no poço, garantindo uniformidade da parede de cimento que será formada no anular entre a formação geológica e a parede externa dos tubos de aço.

Figura 3 – Colunas de Revestimento



Fonte: Acervo do autor, 2024.

O revestimento desempenha um papel crucial no processo de cimentação de poços de petróleo, sendo uma etapa muito importante para garantir a estabilidade

estrutural, segurança operacional e proteção ambiental. Nesta fase, uma tubulação de revestimento é cuidadosamente instalada no poço, descendo até a profundidade desejada (Achang, Yanyao e Radonjic, 2020).

Uma das funções primárias do revestimento é proteger as formações geológicas circundantes. Ao ser abaixado no poço, o revestimento cria uma barreira física entre o fluido de produção do poço e as formações geológicas adjacente. Isso é essencial para prevenir vazamentos indesejados de fluidos para o ambiente subsuperficial, o que poderia causar contaminação do solo ou água subterrânea.

Além disso, o revestimento fornece suporte estrutural para o poço, ajudando a manter sua integridade física e prevenindo o colapso das paredes do poço. Isso é especialmente importante em poços que atravessam formações geológicas instáveis ou sujeitas a altas pressões (Almeida, Junior e Machado, 2016).

A escolha do revestimento adequado depende de uma variedade de fatores, incluindo as condições geológicas e operacionais do poço, bem como os regulamentos de segurança e ambientais aplicáveis. Diferentes tipos de revestimento, como revestimento de aço carbono ou revestimento de liga de cromo, podem ser selecionados com base nas características específicas do poço e nos requisitos de desempenho (Souza e Veloso, 2017).

A camada de cimento formada ao redor do revestimento garante uma vedação hermética e estável. Juntos, esses elementos formam uma barreira robusta que protege tanto o poço quanto as formações geológicas afetadas pela perfuração do poço, essa barreira é muito importante para garantir que não haja contaminação durante o período de produção do poço.

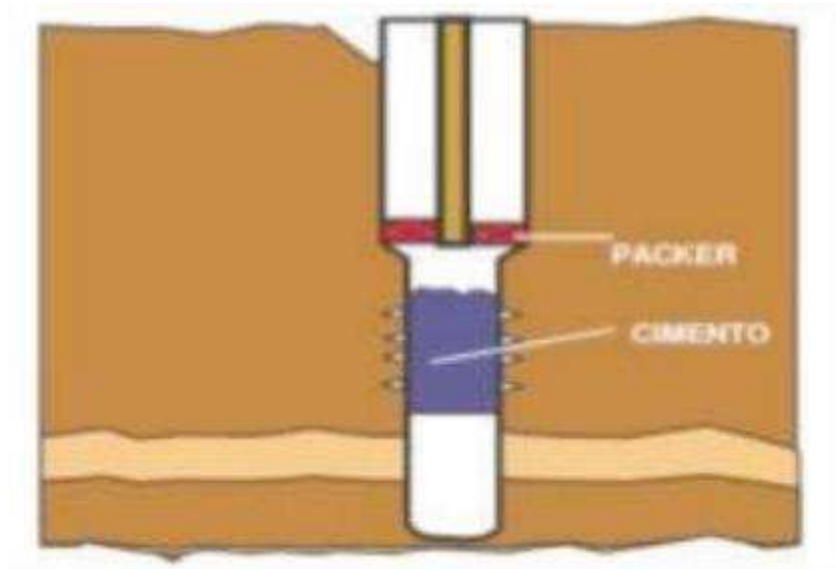
A execução bem-sucedida do revestimento requer a expertise de profissionais qualificados e o uso de equipamentos adequados. Além disso, é essencial seguir padrões de segurança rigorosos e regulamentações ambientais para garantir a integridade e eficiência do poço de petróleo (Almeida, Junior e Machado, 2016).

2.2.4 Compressão do Cimento (Squeeze)

A compressão de cimento, também conhecida como "squeeze", é um procedimento vital na cimentação de poços de petróleo, empregado para corrigir vazamentos ou falhas identificadas na cimentação primária ou na tubulação de revestimento. Esse processo envolve a injeção controlada e forçada de uma pequena

quantidade de pasta de cimento sob alta pressão diretamente na área afetada do poço (Araújo, 2020). Esse procedimento pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Compressão do Cimento ou Squeeze



Fonte: IOPE, 2010.

Antes de realizar o "squeeze", é comum executar o canhoneamento da tubulação de revestimento para permitir um acesso preciso à região onde a compressão de cimento é necessária. Uma vez preparada a área, a pasta de cimento é bombeada com precisão e pressão controlada para dentro do espaço a ser preenchido, formando uma vedação confiável e durável (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

Este procedimento é altamente eficaz para corrigir vazamentos localizados ou falhas na cimentação primária, garantindo a integridade estrutural do poço e evitando potenciais problemas operacionais ou ambientais. A compressão de cimento é uma ferramenta essencial para manter a estanqueidade do poço, preservando assim a segurança e eficiência da operação (Furtado, 2018).

2.2.5 Tamponamento Dos Poços

Os tampões de cimento atuam como isoladores em áreas específicas do poço para criar uma barreira eficaz entre diferentes zonas. Este procedimento é essencial

para garantir a segurança e a integridade do poço, evitando vazamentos indesejados e problemas operacionais (Souza, Carvalho e Filho, 2017; Furtado, 2018).

O processo de instalação dos tampões de cimento começa com o bombeamento de uma pasta de cimento em um trecho específico do poço, geralmente dentro da tubulação de revestimento. Essa pasta de cimento é cuidadosamente posicionada para criar uma vedação confiável e durável, isolando a área problemática do restante do poço (Bezerra, 2006).

Os tampões de cimento são empregados em uma variedade de situações, incluindo casos de perda de circulação de produção, abandono temporário ou definitivo do poço, operações de desvio de poços e correção de vazamentos na tubulação de revestimento (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Ao isolar áreas problemáticas do poço, os tampões de cimento ajudam a prevenir vazamentos indesejados de fluidos para o meio ambiente circundante, garantindo assim a segurança e o meio ambiente (Bezerra, 2006).

Assim, os tampões de cimento são elementos vitais do processo de cimentação de poços de petróleo, desempenhando um papel crucial na garantia da estanqueidade do poço e na prevenção de vazamentos.

2.3 TAMPONAMENTO PARA ABANDONO DE POÇOS

Essa técnica consiste em isolar seções específicas do poço através do uso de tampões de cimento ou outros materiais apropriados, garantindo a vedação e a estabilidade dessas áreas críticas.

Com o contínuo avanço da tecnologia e das técnicas de perfuração, a exploração de petróleo alcançou novos limites, incluindo a perfuração em águas profundas e ultra profundas, além de em formações geológicas cada vez mais complexas. Nesse contexto desafiador, o tamponamento de poços assume um papel ainda mais significativo, assegurando a segurança e a integridade das operações petrolíferas (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Nos poços de petróleo, as seções isoladas pelo tamponamento são críticas para evitar vazamentos e contaminação do meio ambiente, bem como para garantir a segurança dos trabalhadores e das instalações. O uso de tampões de cimento ou outros materiais adequados é fundamental para vedar completamente essas áreas e

impedir a migração indesejada de fluidos entre as formações geológicas (Bezerra, 2006).

Ao isolar seções específicas do poço, os operadores podem controlar melhor o fluxo de fluidos e otimizar a produção, maximizando assim o rendimento do poço. Isso é especialmente importante em ambientes desafiadores, onde cada operação deve ser cuidadosamente planejada e executada para garantir o sucesso (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Em resumo, o tamponamento de poços de petróleo é uma prática essencial que garante a segurança operacional, protege o meio ambiente e otimiza a produção de petróleo.

2.3.1 Procedimentos Para Abandono Temporário e Permanente

Para garantir a segurança e conformidade durante o abandono temporário e permanente de poços de petróleo, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) estabelece uma série de procedimentos detalhados (Bezerra, 2006).

2.3.1.1 Abandono Temporário

Durante o processo de abandono temporário de um poço de petróleo, é fundamental garantir o isolamento adequado do poço para evitar vazamentos indesejados de fluidos. Para isso, são utilizados tampões de cimento e mecânicos, conforme estabelecido pelas especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP). Esses tampões são posicionados de forma precisa, seguindo as diretrizes da ANP, para garantir uma vedação eficaz e segura (Bezerra, 2006).

Além disso, é necessário o correto posicionamento dos tampões de superfície, levando em consideração a profundidade do poço e outras características específicas, em adição, são instaladas barreiras sólidas no interior da coluna de produção e no espaço anular, como medida extra de segurança do poço. Essas barreiras são projetadas para garantir a estabilidade estrutural do poço e prevenir qualquer movimentação indesejada de fluidos durante o período de abandono temporário.

Assim, o isolamento adequado do poço, o posicionamento correto dos tampões de superfície e a instalação de barreiras sólidas são medidas essenciais para garantir a segurança e a eficácia do processo de abandono temporário de poços de petróleo.

O cumprimento rigoroso desses procedimentos contribui para a proteção do meio ambiente e para a integridade das operações petrolíferas (Almeida, Junior e Machado, 2016).

2.3.1.2 Abandono Permanente

Durante o processo de abandono permanente de um poço de petróleo, são adotados procedimentos detalhados para garantir o isolamento adequado dos intervalos de poço aberto. Isso envolve o uso de tampões de cimento e mecânicos, conforme especificado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), para vedar de forma eficaz e segura os intervalos do poço. Esses procedimentos são essenciais para prevenir vazamentos indesejados de fluidos e garantir a segurança ambiental (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

Além disso, é realizada a desativação adequada de todos os equipamentos de poço instalados, seguindo as diretrizes da ANP. Isso inclui a desmontagem e o desligamento de equipamentos de superfície e subsuperfície de maneira segura, garantindo que não haja riscos para os trabalhadores ou para o meio ambiente durante o processo de abandono (Bezerra, 2006).

Em resumo, o isolamento adequado dos intervalos de poço aberto, a desativação correta dos equipamentos de poço e a remoção segura dos equipamentos da locação são aspectos essenciais do processo de abandono permanente de um poço de petróleo. O cumprimento rigoroso desses procedimentos é fundamental para garantir a segurança operacional, a proteção ambiental e a conformidade com as regulamentações governamentais (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

2.3.2 Desafios e Aspectos do Tamponamento

Apesar da importância incontestável do tamponamento de poços de petróleo, essa operação enfrenta diversos desafios técnicos e operacionais, especialmente em ambientes adversos, como águas profundas. Um dos principais desafios está na seleção adequada de materiais e técnicas de tamponamento, que devem ser capazes de garantir a vedação eficaz do poço, mesmo sob condições extremas de pressão e temperatura (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Além disso, a manutenção adequada das estruturas de tamponamento é fundamental para garantir a sua eficácia ao longo do tempo. O desgaste natural, a corrosão e outros fatores ambientais podem comprometer a integridade dos tampões de cimento e mecânicos, tornando necessário um monitoramento constante e a realização de eventuais reparos ou substituições (Araújo, 2020).

Outro desafio importante é a operação em ambientes adversos, como águas profundas, onde as condições operacionais são mais desafiadoras e os riscos de acidentes são maiores. Nesses casos, é fundamental contar com equipamentos e tecnologias adequadas, além de equipes altamente treinadas, para garantir a segurança e o sucesso das operações de tamponamento.

Apesar desses desafios, é inegável que o tamponamento de poços desempenha um papel crucial na indústria petrolífera moderna. Além de garantir a segurança operacional e a proteção ambiental, essa prática também contribui para a eficiência da produção de petróleo, permitindo o controle adequado do fluxo de fluidos e a otimização dos processos de exploração e produção (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

À medida que a exploração de petróleo avança para ambientes cada vez mais desafiadores, como águas profundas e formações geológicas complexas, o tamponamento de poços continuará a ser uma prática essencial para garantir o sucesso e a sustentabilidade das operações petrolíferas. Portanto, investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e inovação são essenciais para superar os desafios existentes e garantir o futuro da indústria petrolífera.

2.4 REGRAS E NORMAS

As normas e regulamentações estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) desempenham um papel fundamental na garantia da segurança e eficácia das atividades de tamponamento e abandono de poços de petróleo no Brasil. A Portaria ANP nº 25, de 6 de março de 2002, é um marco regulatório que define diretrizes claras para essas operações, visando assegurar que sejam conduzidas de maneira adequada e segura, em conformidade com os padrões estabelecidos (Bezerra, 2006).

Uma das principais preocupações das normas da ANP é garantir o perfeito isolamento das zonas de petróleo e/ou gás, bem como dos aquíferos existentes, a fim de prevenir a migração indesejada de fluidos. Isso é crucial para evitar vazamentos, contaminação do meio ambiente e potenciais riscos à segurança das operações (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Além disso, as normas estabelecem requisitos específicos para os materiais a serem utilizados no tamponamento, como tampões de cimento, e os métodos de aplicação. Esses materiais e técnicas devem ser selecionados e aplicados de acordo com os mais altos padrões de qualidade e segurança, garantindo a eficácia do isolamento das seções específicas do poço (Araújo, 2020).

A Portaria ANP nº 25 também aborda questões relacionadas aos custos envolvidos no processo de abandono de poços, definindo claramente o que é considerado como custo de abandono. Isso proporciona transparência e orientação às empresas do setor petrolífero sobre os investimentos necessários para garantir o perfeito isolamento das áreas críticas do poço (Bezerra, 2006).

Além disso, as normas da ANP estabelecem prazos e procedimentos para o abandono temporário e permanente de poços, delineando os passos que devem ser seguidos para garantir que as operações sejam conduzidas de maneira eficiente e segura (Araújo, 2020).

Em suma, as normas e regulamentações estabelecidas pela ANP desempenham um papel fundamental na garantia da segurança, eficácia e conformidade das operações de tamponamento e abandono de poços de petróleo no Brasil.

2.5 OPERAÇÃO DE SQUEEZE

O fechamento adequado de poços de petróleo é uma etapa crítica na gestão de reservatórios. Garantir uma vedação eficaz é essencial para prevenir vazamentos de fluidos prejudiciais ao meio ambiente, evitar a contaminação de aquíferos e assegurar a segurança dos trabalhadores e das instalações. Além disso, um fechamento eficiente contribui para otimizar a produção de petróleo, minimizando perdas e maximizando a eficiência operacional (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Em situações em que os processos de cimentação primária nem sempre alcançam os resultados desejados, os squeezes surgem como uma solução eficaz para corrigir falhas e manter a integridade estrutural dos poços. Essa técnica possibilita o isolamento de zonas problemáticas, a vedação de vazamentos e até mesmo a revitalização de poços não produtivos, promovendo, assim, a segurança operacional e ambiental na indústria petrolífera (Almeida, Junior e Machado, 2016).

2.5.1 Procedimento e tipos de squeeze

A técnica de squeeze no fechamento de poços de petróleo representa um processo detalhado e crucial para corrigir falhas na cimentação primária, vedar áreas problemáticas e assegurar a integridade estrutural dos poços. Esse procedimento desempenha um papel fundamental na prevenção de vazamentos, na isolação de zonas indesejadas produtoras de gás, óleo ou água, e na melhoria geral da eficiência da produção de petróleo (Almeida, Junior e Machado, 2016).

Existem diferentes tipos de squeezes, cada um com suas aplicações específicas:

Squeeze de baixa pressão: Este tipo de squeeze é empregado para formar uma camada filtrante de cimento desidratado na formação, sem causar fraturas. É ideal para situações em que a formação possui baixa permeabilidade, garantindo a eficácia do preenchimento sem comprometer a integridade da formação (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

Squeeze de alta pressão: Utilizado quando é necessário aplicar pressão suficiente para forçar o cimento a penetrar em formações com maior resistência. Esse tipo de squeeze pode resultar em fraturas controladas para assegurar o preenchimento completo do espaço vazio, sendo essencial para garantir a vedação adequada em condições mais desafiadoras (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

Squeeze de bloqueio: Esse método é adotado para isolar zonas produtoras específicas, exigindo a perfuração prévia de intervalos na coluna de revestimento para permitir o fluxo do cimento. (Souza, Carvalho e Filho, 2017).

Esses diferentes tipos de squeezes são selecionados com base nas características geológicas e nas condições do poço, garantindo uma operação de fechamento eficaz e segura.

2.5.2 Processo de Execução do Squeeze

O processo de execução do squeeze envolve uma série de etapas cruciais para garantir o sucesso da operação. Os aspectos importantes nesse processo são:

Deve-se realizar uma seleção criteriosa dos tipos de cimento, aditivos e fluidos de perfuração, levando em consideração sua compatibilidade e as propriedades necessárias. Isso inclui considerações sobre a temperatura e a pressão do poço, bem como as características da formação geológica (Souza e Veloso, 2017).

Parâmetros de operação: Antes da execução do squeeze, é necessário determinar com precisão os parâmetros de operação, como a pressão de injeção, taxa de injeção, volume de cimento e outros aspectos operacionais. Isso é feito por meio de cálculos detalhados e testes de laboratório, que levam em conta as características específicas do poço e das formações geológicas envolvidas. A determinação precisa desses parâmetros é essencial para garantir que o cimento seja injetado adequadamente e que o squeeze seja realizado com sucesso (Bezerra, 2006).

Controle de qualidade e segurança: Durante todas as fases da operação de squeeze, é crucial implementar medidas rigorosas de controle de qualidade e segurança. Isso inclui a realização de inspeções detalhadas dos equipamentos utilizados, o monitoramento contínuo da pressão e temperatura do poço, e a adoção de práticas de trabalho seguras para prevenir acidentes e incidentes (Souza e Veloso, 2017).

Assim, a execução bem-sucedida de uma operação de squeeze requer uma abordagem cuidadosa e metódica, desde a seleção dos materiais até o controle de qualidade e segurança durante a operação. Ao garantir que todos os aspectos importantes sejam devidamente considerados e monitorados, é possível realizar o fechamento eficaz e seguro de poços de petróleo usando essa técnica crucial na indústria petrolífera.

2.6 DEMANDA DE TAPONAMENTO DE POÇOS

O aumento da demanda pelo abandono de poços é previsto para os próximos cinco anos, devido a aproximação do fim do ciclo de vida e uma grande quantidade de poços produtores em atividade, principalmente dos poços onshore (em terra).

A exploração comercial do petróleo no Brasil começou na década de 40, com a inauguração do campo de exploração de Candeias (BA), em 1941. O incentivo da exploração onshore seguiu até a década de 80, quando o potencial gigantesco de produção dos campos de petróleo marítimos começou a ser descoberto, e por consequência, levou ao aumento de investimento para a produção offshore. Desta forma, a perfuração de poços em terra teve seu ápice entre 1940 e 1980, e experimentou uma queda vertiginosa após o descobrimento da bacia de Santos e demais bacias marítimas.

De acordo o acervo de dados da ANP, em maio de 2024 constam no Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) o total de 21.382 poços terrestres cadastrados nos estados de Alagoas, Bahia, Espírito Santo, Sergipe e Rio Grande do Norte, destes, apenas 8.072 estão em atividade, ou aptos para operar.

Neste contexto, grande parte dos poços em operação, ou com potencial para operar, possuem mais de 60 anos de idade, e caminham para o fim de seu ciclo de vida. Esse fenômeno gera um aumento natural do descomissionamento e poços, e consequentemente, pelos serviços de tamponamento. Devido ao período de exploração de petróleo brasileiro ser relativamente curto, pode-se concluir que é a primeira geração de poços perfurados que alcança o fim de seu ciclo de vida, assim, o Brasil enfrenta pela primeira vez a necessidade de descomissionamento em massa de poços, com tamponamento permanente, devido a idade dos poços.

Em países como os Estados Unidos, em que a exploração de petróleo já alcançou mais de um século em prática, a estrutura, conhecimento e tecnologia para cimentação de abandono já se estabeleceu, cabe as empresas brasileiras desenvolver suas soluções para entrar nessa fatia de mercado, e competir com as empresas líderes desse mercado.

2.7 UNIDADE DE CIMENTAÇÃO

As Unidades de Cimentação (UCs) são equipamentos projetados para realizar uma variedade de tarefas críticas que requerem muita precisão. As operações de cimentação acompanharão o poço do início ao fim de seu ciclo de vida, e portanto, são importantes para garantir sua viabilidade produtiva ao longo das décadas de produção.

O funcionamento das UCs envolve uma série de etapas complexas. Primeiramente, essas unidades são equipadas com sistemas de mistura que combinam cimento, água e aditivos em proporções específicas para formar a pasta

de cimento. Este processo requer precisão, pois a composição adequada da pasta é essencial para garantir uma cimentação eficaz e durável (Furtado, 2018).

Além disso, as UCs são equipadas com sistemas de bombeamento que pressurizam a pasta de cimento e a injetam no poço a ser cimentado. A pressão e a taxa de fluxo desses sistemas precisam ser cuidadosamente controladas para garantir que a pasta seja distribuída de maneira uniforme ao longo do revestimento do poço, preenchendo todos os espaços vazios e garantindo uma vedação adequada.

Outro aspecto importante do funcionamento das UCs é sua capacidade de lidar com uma variedade de condições operacionais. Isso inclui a capacidade de operar em diferentes profundidades de poço, bem como em ambientes adversos, como operações offshore. Para atender a essas demandas, as UCs são frequentemente projetadas com materiais robustos e sistemas de engate rápido que facilitam a mobilidade e a montagem em diferentes locais de trabalho (Furtado, 2018).

No que diz respeito às normas e regulamentações, várias organizações estabelecem diretrizes técnicas e padrões de segurança para operações de cimentação. O API, por exemplo, desenvolve normas específicas para cimentação de poços, abordando questões como composição de fluidos de cimentação, testes de qualidade e procedimentos operacionais. Da mesma forma, a ISSO estabelece normas globais para equipamentos e processos relacionados à indústria petrolífera, incluindo diretrizes para operações de cimentação (Araújo, 2020).

Além das normas internacionais, órgãos reguladores governamentais, como a ANP no Brasil, impõem regulamentações específicas para garantir a segurança e a conformidade das operações de cimentação. Essas regulamentações abrangem desde requisitos de licenciamento e procedimentos de segurança até padrões ambientais e de saúde ocupacional (Furtado, 2018).

Em conclusão, as Unidades de Cimentação desempenham um papel crucial na garantia da integridade dos poços de petróleo. Seu funcionamento envolve uma série de processos complexos e precisos, desde a preparação da pasta de cimento até sua injeção no poço. Além disso, o cumprimento das normas e regulamentações é essencial para garantir a segurança e a conformidade das operações de cimentação.

2.7.1 Unidades de Cimentação Modernas

Atualmente o mercado de cimentação de poços de petróleo é dominado por duas grandes multinacionais: a americana Halliburton Company, e a francesa Schlumberger Limited (SLB), fundadas respectivamente em 1919 e 1926. Estas empresas consolidadas a décadas no mercado são não somente as grandes líderes de mercado, como também são as maiores detentoras de patentes, e grandes financiadoras do desenvolvimento e inovações na área de cimentação de poços.

Com quase um século de atuação, as histórias da Halliburton e Schlumberger se misturam com a história do desenvolvimento da cimentação, neste contexto, as unidades de cimentação no portfólio destas duas grandes empresas são altamente tecnológicas e automatizadas, contando com diversos sensores e atuadores que acompanham em tempo real a qualidade da pasta de cimento misturada, analisando a relação de mistura cimento/água/aditivo, e automaticamente ajustando as frações para manter a pasta de cimento conforme os parâmetros de densidade, concentração de aditivos, bem como assegurar o volume correto de mistura de pasta e regular a pressão de bombeio automaticamente.

Tantos avanços tecnológicos tornam a operação destas unidades de cimentação extremamente precisas e confiáveis, contudo, o custo de manutenção e operação destes equipamentos sobe vertiginosamente, o que é refletido custo repassado para as empresas operadoras de petróleo, como a Petrobrás, que são grandes contratantes deste tipo de serviço.

Além da tecnologia empregada nos equipamentos da Halliburton e Schlumberger (SLB), suas unidades de cimentação são robustas, construídas para atender as diversas demandas de cimentação, desde a cimentação de primária de poços profundos até o tamponamento de poços rasos. Desta forma, essas potentes unidades de cimentação costumam ser empregadas mesmo em operação pequenas, e carregam todo o custo de operação associado ao seu projeto robusto, encarecendo desproporcionalmente os serviços mais leves, em que a unidade de cimentação padrão é considerada superdimensionada.

Figura 5 – Unidade de Cimentação CPF-377



Fonte: SLB, 2018

A CPF-377 é uma unidade robusta que conta com duas bombas triplex para bombeio de pasta, com pressão de trabalho máxima de 15.000 psi, e vazão de até 13,2 bbl/min (2,09 m³/min), cada bomba é acionada por um motor Caterpillar C13 Accert com 475 bhp. O equipamento pesa em torno de 35 toneladas, equipada com CemCAT (Cementing Computer-aided Treatment), uma ferramenta de controle em tempo real que acompanha a operação mantendo todos os parâmetros dentro dos conformes. Graças a esta tecnologia, a CPF-377 é capaz de operar com mistura contínua de pasta, o que garante uniformidade das propriedades cimento mesmo com os tanques da unidade possuindo volume considerado pequeno (dois tanques de deslocamento de 10 bbl cada, dois tanques de mistura com 6 e 14 bbl cada).

Este equipamento precisa ser acompanhado por uma carreta com reboque tipo cisterna com armazenamento de cimento em pó e aditivos, o que aumenta ainda mais a complexidade e logística de operação.

2.7.2 Unidade de Cimentação Modular

Uma alternativa para a unidade de cimentação sobre rodas, é a utilização de conjuntos de equipamentos em módulo, que trabalham em conjunto durante as operações, mas podem ser transportados separadamente. Este tipo de unidade de cimentação é comum na cimentação offshore, e em operações onde um grande

volume de pasta deve ser empregado, o que geraria a necessidade de uma unidade de cimentação grande, com tanques capazes de armazenar grandes volumes, o que comprometeria a instalação de todos os componentes em uma única carreta.

Normalmente a unidade de cimentação modular é dividida em três módulos, ou conjunto de equipamentos independentes:

- Caminhão de Cimento: carreta com reboque do tipo reservatório de cimento em pó, e de aditivos.
- Caminhão Pipa: caminhão com carga de água para ser misturado ao cimento em pó.
- Batch-Mixer: conjunto de componentes responsáveis por misturar água, cimento em pó e aditivos, para formar a pasta de cimento.
- Bomba Triplex: conjunto da bomba triplex e seus componentes acionadores, responsável por bombear a pasta de cimento do Batch-mixer.

Figura 6 - Batch-mixer.



Fonte: Acervo do autor, 2024

A figura 6 mostra um batch-mixer sobre rodas de propriedade da Braserv Petróleo, este equipamento possui todo o sistema hidráulico de funcionamento para fazer a mistura da pasta de cimento, com acionamento através do painel de controle posicionado na plataforma entre os tanques. O batch-mixer conta com dois tanques de mistura de 50 bbl cada, com uma capacidade total de 100 bbl em uma única batelada.

Figura 7 – Caminhão transportador de cimento em pó, com reboque do tipo reservatório.



Fonte: Metalesp, 2024

A figura 7 mostra o reboque tipo reservatório de cimento em pó, que é atrelado aos caminhões que acompanham as unidades de cimentação que não possuem reservatório próprio de cimento em pó. Uma alternativa ao reboque do tipo reservatório, é o transporte do cimento em sacos de uma tonelada, carregados normalmente na carroceria de caminhões, nestes casos usualmente é utilizado um caminhão Munck para realizar a manobra do cimento ensacado.

2.7.3 Unidade de Cimentação BRASERV UC-01

O projeto da UC-01 foi concebido com a finalidade de entregar um equipamento capaz de inserir a BRASERV no mercado das operações de cimentação. Sendo a UC-01 o primeiro passo em uma área ainda inexplorada pela empresa, os requisitos técnicos do projeto foram concebidos para garantir uma maior estabilidade e segurança nesta nova etapa, minimizando riscos e ao mesmo tempo garantindo um diferencial na competição com as concorrentes.

- Custo reduzido de construção: ao reaproveitar materiais do inventário de equipamentos da BRASERV, adquiridos para demandas passadas, mas que não foram aproveitados.

- Custo baixo de operação: conferindo uma boa margem de segurança quanto ao preço do serviço na elaboração das propostas que concorrem durante as licitações.
- Funcionamento simplificado: garantindo que o equipamento possua uma manutenção e operação mais rápida e fácil, possibilitando que profissionais não experientes com o equipamento possam realizar rotinas de inspeção e manutenções mais básicas, e, reduzir o tempo de treinamento dos operadores.
- Boa confiabilidade: certificando que o equipamento possa operar em locais remotos, distantes das bases de apoio, com menor risco de falhas.

Para obter uma entrada sólida no mercado de cimentação, foi definido que a UC-01 seria uma unidade especializada em operações de tamponamento de poços e squeeze. Assim, os requisitos técnicos seriam mais facilmente aplicados, visto que as operações de tamponamento e squeeze são consideradas as mais seguras, de menor dificuldade, com menor exigência de matéria-prima (cimento e aditivos), e, com menor necessidade de desempenho por parte do equipamento.

Desta forma, a UC-01 foi projetada com tanques e reservatórios menores e mais leves, capazes de comportar o volume suficiente para realizar tampões e squeezes, ao mesmo tempo, o sistema hidráulico e de bombeio puderam ser montados com componentes menos robustos. Estas características garantem a funcionalidade nas operações específicas para a qual a UC-01 foi pensado, contudo não enquadraria para operações de cimentação primária, onde são necessários grandes reservatórios e maiores vazões cimento.

Assim podemos definir os parâmetros operacionais como:

- Reservatório de fluido de teste, ou água de mistura (Tanque de deslocamento) reduzido: com capacidade de 20 bbl, suficiente para misturar volumes de pasta para operações de tamponamento e squeeze, com facilidade.
- Tanque de mistura reduzido: com capacidade de 22 bbl, também calculado para atender as demandas de volume de tamponamento e squeeze.

- Silo de cimento integrado a unidade: em unidades de cimentação padrão, o cimento em pó é transportado em caminhões equipados com reboques do tipo cisterna para cimento, conhecidos popularmente como bulk de cimento. O silo de cimento integrado na unidade, dimensionado para comportar pouco mais de 60 sacos (3 toneladas) apesar de possuir capacidade em volume muito menor, é capaz de carregar cimento em pó suficiente para quatro operações de tamponamento, ao mesmo tempo que elimina a necessidade de uma carreta extra acompanhando a unidade durante as operações.
- Componentes hidráulicos menos robustos: o volume menor de capacidade de mistura de pasta da unidade, também refletiu em uma carga menor para as bombas e motores responsáveis por distribuir a força necessária para o sistema de mistura, o que possibilitou que componentes hidráulicos de menor vazão e pressão fossem selecionados, o que barateou o custo de construção.
- Bomba triplex menos robusta: o tampão de cimento é realizado com uma quantidade pequena de pasta quando comparado à cimentação de revestimento, somado ao fato de que poços em processo de descomissionamento usualmente não possuem alta pressão do reservatório, portanto o bombeio é feito com um volume menor de pasta de cimento em um poço que não possui contrapressão significativa, o que elimina a necessidade de uma bomba triplex de alta vazão e alta pressão para este tipo de operação.

2.7.4 Equipe de Construção UC-01

A UC-01 foi construída por uma equipe de manutenção dedicada ao projeto, com o apoio técnico da JF Consultoria, uma empresa prestadora de serviço que acompanhou o projeto compartilhando sua experiência com operações de cimentação.

Ao longo do projeto, os colaboradores passaram por substituição e revezamento de setores, contudo é correto afirmar que durante o período da

construção da UC-01, a configuração da equipe que permaneceu por maior tempo foi formada por onze membros:

- 1 Gerente de operações (Engenheiro Mecânico)
- 1 Supervisor de operações (Graduando em Engenharia Mecânica)
- 1 Membro da JF Consultoria (Operador experiente de equipamentos de cimentação)
 - 1 Mecânico
 - 1 Eletricista
 - 3 Soldadores
 - 3 Auxiliares

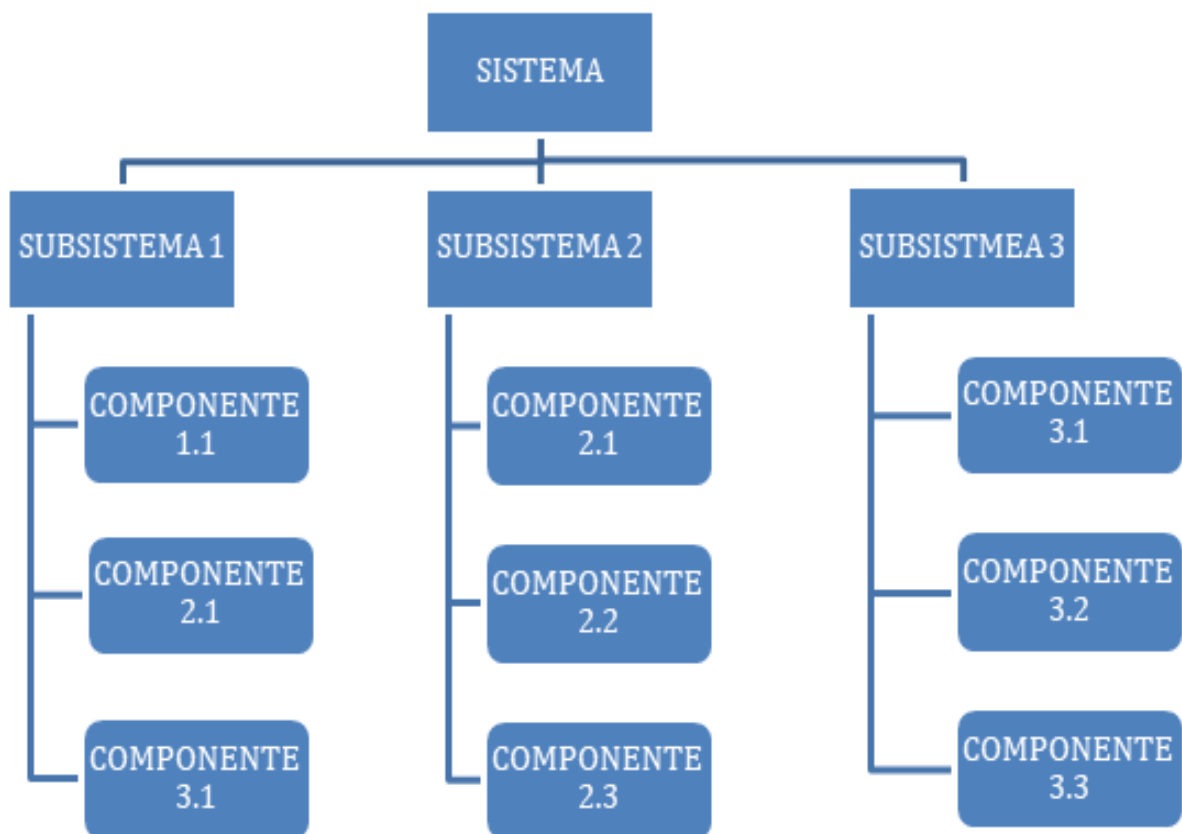
Nessa equipe, com exceção do gerente de operações, todos os outros membros estavam locados na base em Alagoinhas, no pátio onde ocorreu a construção da UC-01. Enquanto o gerente de operações, residente de Macaé – RJ, acompanhou o projeto de forma remota.

Apenas os membros da JF Consultoria possuíam conhecimento de campo, operacional e de manutenção de unidades de cimentação. A JF Consultoria apresentou os princípios de funcionamento, políticas de bom uso, e insights de layout para o desenvolvimento da UC-01, enquanto coube ao supervisor de operações conciliar o conhecimento recebido dos membros da JF Consultoria aos requisitos técnicos e parâmetros operacionais requeridos para a UC-01, garantir que a seleção e dimensionamento dos componentes do sistema estivesse compatível com o desempenho esperado, e adequar todo o equipamento nas normas reguladoras necessárias, junto ao setor de SMS (Saúde, Meio-ambiente e Segurança).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento da Unidade de Cimentação Compacta (UC-01) da BRASERV Petróleo LTDA foi fundamentada na técnica de integração aplicada ao desenvolvimento de produtos/equipamentos de engenharia. Esta abordagem proporcionou uma estrutura organizada para o gerenciamento do projeto, permitindo a categorização dos equipamentos em sistema, subsistema e componentes, o que facilitou a visualização sistêmica e detalhada dos processos macros envolvidos na construção, montagem, manutenção e operação da máquina projetada, conforme ilustrado na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Fluxograma Metodológico do Desenvolvimento da Unidade de Cimentação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A técnica de integração envolveu a avaliação de cada componente da UC-01 quanto à sua abordagem de engenharia, levando em consideração quatro categorias principais:

Compra: Componentes nos quais o melhor custo-benefício é obtido através da aquisição direta de fornecedores. Essa escolha é motivada por diversos fatores, como falta de capacidade para fabricação própria, custos elevados de produção, ou tempo extenso de fabricação.

Adaptação: Componentes disponíveis no mercado, mas que requerem ajustes para se adequarem aos requisitos do projeto ou ao regime de operação desejado.

Cópia: Fabricação de componentes baseada em soluções existentes no mercado. Esta abordagem é adotada quando a aquisição do componente original não é viável devido a diversos fatores, como disponibilidade no mercado, prazos de entrega, custos associados à compra, complexidade de transporte, entre outros.

Desenvolvimento: Componentes que precisam ser customizados especificamente para atender às demandas do projeto e, portanto, não estão disponíveis no mercado. Nesses casos, a fabricação e desenvolvimento dos componentes são realizados internamente pela equipe do projeto.

A partir dessa metodologia de integração, o projeto da UC-01 foi concebido, levando em consideração as características específicas de cada componente e sua função dentro do sistema. Além disso, a análise detalhada dos requisitos operacionais e de desempenho permitiu a seleção dos melhores enfoques de engenharia para cada parte da unidade de cimentação.

A implementação dessa metodologia de integração proporcionou uma visão integrada e abrangente do projeto, garantindo não apenas a eficiência e confiabilidade da UC-01, mas também otimizando os custos e prazos de desenvolvimento, além de assegurar a compatibilidade com as exigências ambientais e regulatórias do setor petrolífero. A utilização dos equipamentos disponíveis no inventário da BRASERV Petróleo LTDA também representou uma estratégia eficaz para reduzir os custos de construção da unidade, sem comprometer sua qualidade ou desempenho.

O processo de desenvolvimento da Unidade de Cimentação, conforme delineado na metodologia de integração, adotou uma abordagem baseada em uma ferramenta de integração aplicada. O objetivo principal era viabilizar a condução de múltiplas etapas do projeto de forma simultânea, sem que houvesse interferências entre elas.

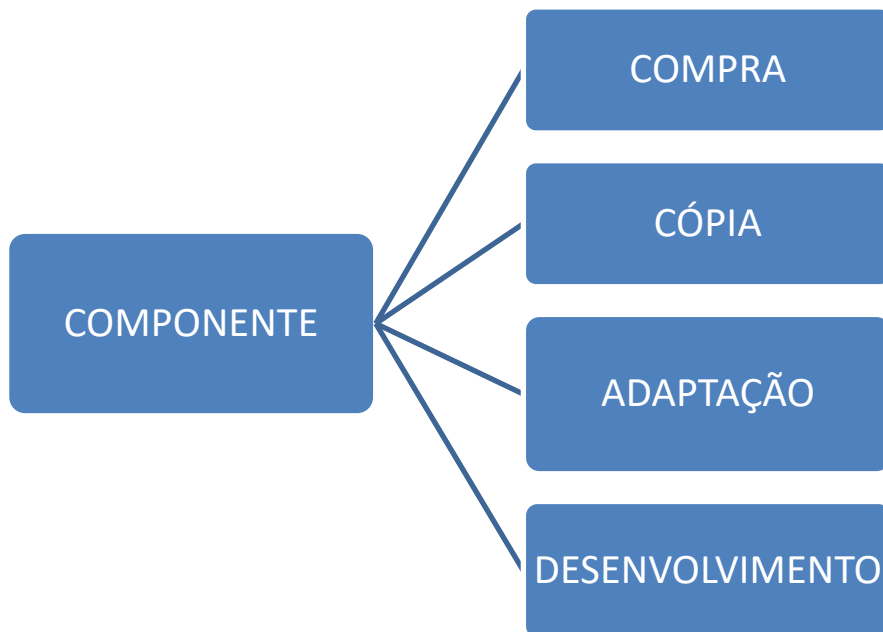
Essa ferramenta de integração aplicada é fundamental no contexto do desenvolvimento de produtos e equipamentos de engenharia. Ela desempenha um

papel crucial no gerenciamento de projetos de máquinas, permitindo a organização dos elementos do projeto em sistemas, subsistemas e componentes.

A divisão sistemática resultante proporciona uma visão mais concisa dos processos macro, possibilitando uma detalhada descrição dos passos a serem seguidos durante as fases de construção, montagem, manutenção e operação da máquina em questão.

Dentro dessa estrutura sistemática, a técnica de integração implica na avaliação de cada componente em relação à abordagem de engenharia que deve ser adotada pelo gestor do projeto, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Fluxo de Decisão para Confecção de Componentes



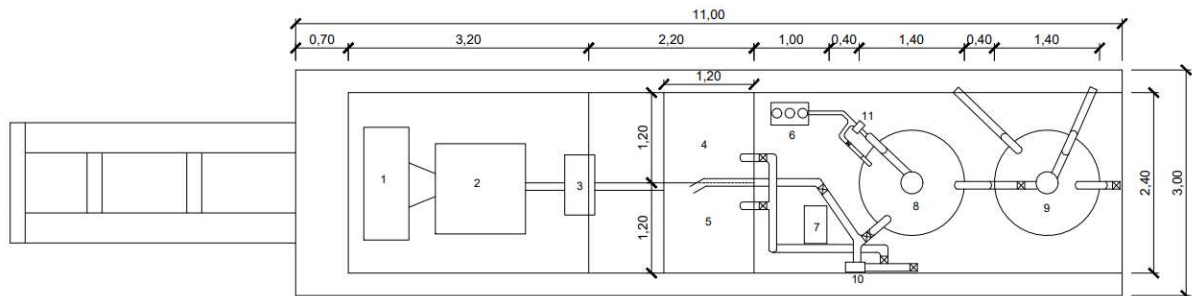
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4 RESULTADOS

4.1 BRASERV UC-01 Unidade de Cimentação Compacta

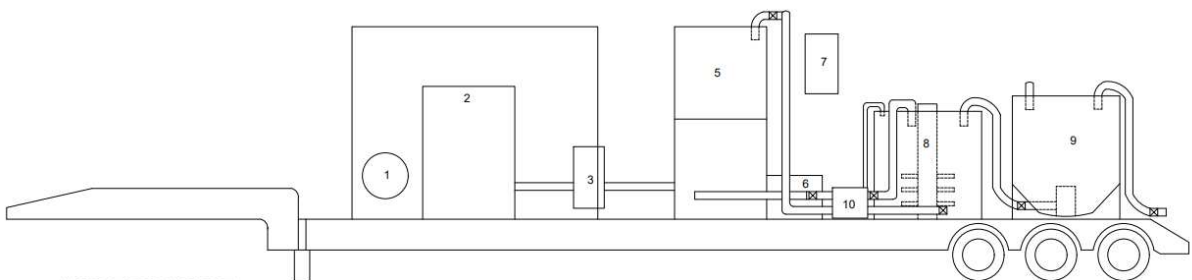
A primeira unidade de cimentação da BRASERV Petróleo, conhecida como Unidade de Cimentação 01 (UC-01), foi projetada como um equipamento inovador e pioneiro para a empresa. Uma concepção inicial registrada em um esboço está ilustrada nas figuras 10, 11.

Figura 10 – Vista superior do primeiro layout pensado para a UC-01



Fonte: Braserv Petróleo, 2024.

Figura 11 – Vista lateral do primeiro layout pensado para a UC-01



Fonte: Braserv Petróleo, 2024.

Os equipamentos montados sobre uma prancha baixa como indicados no layout:

1. Radiador
2. Motor diesel acionador da bomba triplex
3. Caixa de marchas
4. Tanque de deslocamento 1
5. Tanque de deslocamento 2
6. Bomba triplex

7. Painel de controle
8. Tanque de Mistura com Agitador
9. Silo de cimento
10. Centrífuga de captação
11. Centrífuga de mistura

Ao longo das reuniões de desenvolvimento, o projeto sofreu grandes alterações, seguindo os parâmetros de operação e requisitos de projeto, os reservatórios previstos (tanques de deslocamento 1 e 2, tanque de mistura e silo de cimento) foram redesenhados.

Um ensaio do layout foi executado na base em alagoinhas, utilizando uma unidade de bombeio offshore e tanques do inventário da Braserv, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Ensaio do posicionamento dos equipamentos sobre a prancha.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

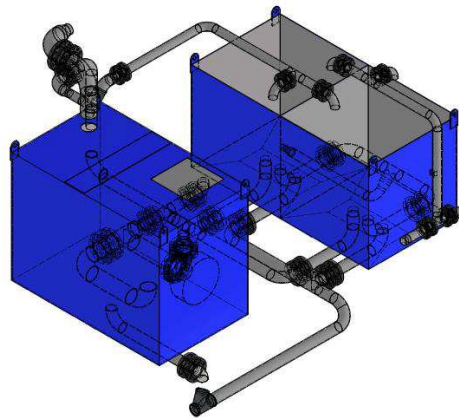
O silo foi reduzido para diminuir o peso sobre a prancha baixa, ao mesmo tempo que mantinha o volume de cimento em pó suficiente para realizar no mínimo três operações, com segurança.

Os tanques de deslocamento 1 e 2 foram redesenhados em um tanque de deslocamento único, com capacidade de 20 bbl. Diminuindo a estrutura, e mantendo um volume suficiente de água para realizar um tampão, com sobra de água para manobra de recirculação de água para lavar as linhas de cimento, evitando bloqueio das tubulações de mistura.

O tanque de mistura foi redesenhado, adotando uma geometria retangular, o que proporcionou um melhor posicionamento sobre a prancha, ganhando espaço para instalação de áreas de movimentação do operador.

A Figura 13 mostra o design após mudanças no tanque de mistura (esquerda) e tanque de deslocamento (direita), assim como a posição da tubulação de mistura, em cinza.

Figura 13 - Esquema inicial do subsistema de mistura da Unidade de Cimentação 01



Fonte: Acervo do autor, 2024.

O conjunto motor, caixa de marcha e bomba triplex foi adaptado de uma unidade de bombeio offshore do inventário de itens da Braserv, essa unidade de bombeio montada sobre skid, como ilustrado na Figura 14, possui o peso aproximado de 9 toneladas.

Figura 14 – Unidade de bombeio offshore montada sobre skid.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Visando a melhor distribuição de peso na estrutura da carreta (prancha baixa), o layout do pré-projeto foi invertido, reposicionado o conjunto motor, caixa de marcha e bomba para o fundo da prancha em cima dos eixos.

Os tanques que permanecem vazios e só são preenchidos no momento da operação foram posicionados no meio da prancha, enquanto o silo que é preenchido com cimento em pó antes de iniciar as operações foi posicionado próximo ao pescoço da prancha, em uma área mais próxima do pino rei.

A disposição final dos itens pode ser observada na Figura 15, obtida já na fase de posicionamento final dos equipamentos, meses após o esboço do primeiro layout.

Figura 15 – Posicionamento final dos equipamentos sobre a prancha.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

O projeto recebeu o nome de Unidade de Cimentação Compacta devido às suas características específicas. A Unidade de Cimentação, de TAG UC-01 é equipada com o chamado "trio completo", o que significa que engloba os três subsistemas essenciais para sua operação: o subsistema pneumático de descarga de cimento, o de mistura da pasta de cimento e o de bombeio do cimento para o poço.

A integração harmoniosa de todos os componentes na UC-01 foi viabilizada pelo escopo de operações claramente definido, que permitiu dimensionar adequadamente o tamanho dos reservatórios, otimizando o espaço de instalação.

Dentre os componentes do projeto e suas respectivas funções, destacam-se:

- O silo de cimento, responsável por armazenar o cimento em pó e descarregá-lo para o tanque de mistura;
- O compressor de ar, utilizado para pressurizar o silo;
- O balão de derivação, que controla e direciona a vazão de ar do compressor;
- O motor diesel de 6 cilindros, que aciona a bomba hidráulica e o compressor, entre outros;
- A bomba hidráulica de pistões axiais e a de engrenagens, acionadas pelos motores hidráulicos 1 e 2, respectivamente;
- O motor hidráulico de pistões e o orbital, responsáveis por acionar a bomba centrífuga e agitador, respectivamente;
- A válvula reguladora de vazão, utilizada para controlar a velocidade do misturador;
- A bomba centrífuga, responsável por circular água nos tanques, misturar a pasta de cimento e dar pré-carga para a bomba triplex;
- O tanque de deslocamento e o de mistura, destinados a armazenar fluido e pasta de cimento, respectivamente;
- O agitador, responsável por manter a pasta em movimento;
- O motor diesel de V8, utilizado para acionar a bomba triplex;
- A caixa de marcha e o eixo cardan, responsáveis por controlar e transmitir a rotação do motor diesel 2 para a bomba triplex;
- A bomba triplex, que bombeia a pasta de cimento para o poço.

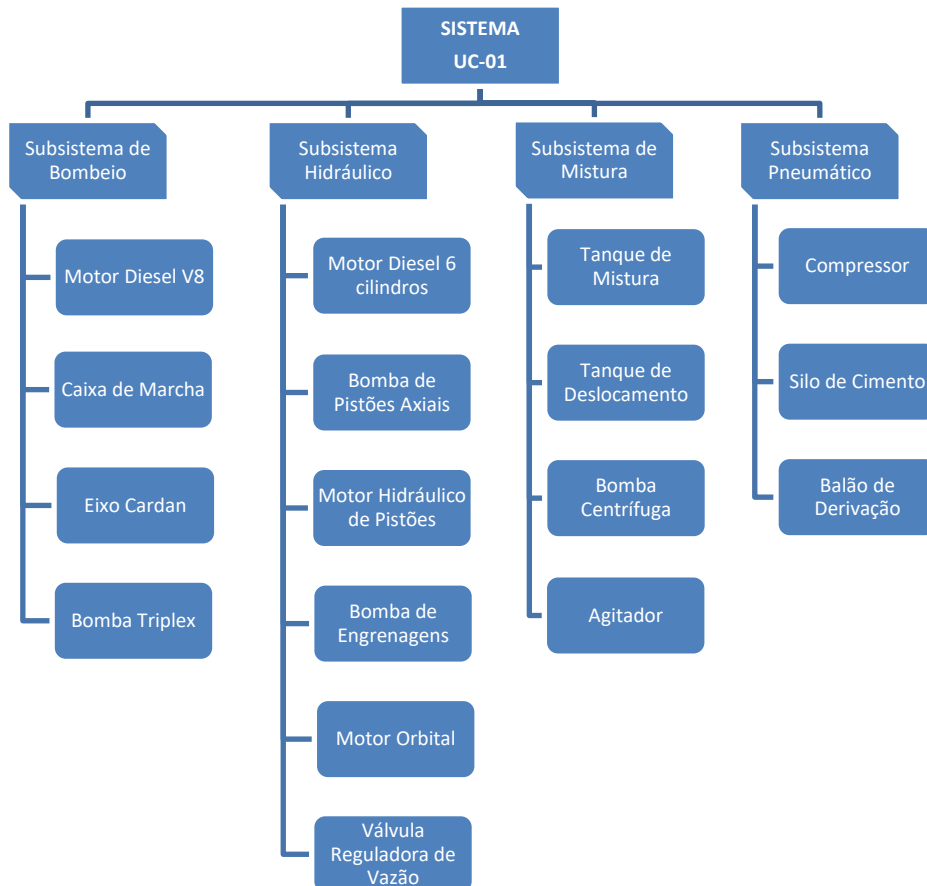
A Braserv Petróleo possui um inventário de equipamentos disponíveis para implementação em projetos de engenharia. Dentre esses equipamentos, destacam-se motores de combustão interna de ciclo Diesel e Otto, bombas hidráulicas e centrífugas, motores elétricos, entre outros materiais do setor de petróleo e gás. Para o projeto da UC-01, uma estratégia para redução de custos foi a utilização desses equipamentos disponíveis no inventário da BRASERV.

O projeto da Unidade de Cimentação UC-01 foi estruturado com base em uma abordagem sistêmica, organizando os sistemas, subsistemas e componentes em uma hierarquia clara.

A UC-01 é considerada o Sistema, representando a instância principal que engloba os subsistemas. Os conjuntos de equipamentos foram agrupados conforme suas funções nas diferentes etapas de operação da UC-01. Essas etapas são: a pressurização e transporte pneumático do cimento em pó (Subsistema Pneumático), o acionamento de bombas e motores hidráulicos (Subsistema Hidráulico), a circulação de fluido e cimento em pó, mistura da pasta e pré-carga de bombeamento (Subsistema de Mistura), e o bombeamento da pasta de cimento para o poço (Subsistema de Bombeamento).

O fluxograma resultante da organização desses elementos se apresenta dividido em 4 subsistemas, o Subsistema de Bombeio, o Subsistema Hidráulico, o Subsistema de Mistura e o Subsistema Pneumático, todos com suas especificações de equipamentos suas funções definidas no processo de Cimentação, conforme a Figura 16 a seguir.

Figura 16 - Fluxograma dos Sistemas da Unidade de Cimentação 01 e seus Componentes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.1.1 Subsistema 1: Sistema de Bombeio

O Subsistema de Bombeio da Unidade de Cimentação UC-01 desempenha um papel vital, impulsionando a pasta de cimento para o poço durante as operações de cimentação. Composto por quatro elementos essenciais, cada um com funções específicas, esse subsistema garante o fluxo adequado do material.

O Motor Diesel V8, ilustrado na Figura 17, proveniente do inventário de equipamentos da BRASERV, foi originalmente utilizado em uma unidade de bombeio offshore e adaptado para o projeto da UC-01. Para acionar satisfatoriamente a bomba triplex e os demais mecanismos do subsistema, o motor v8 possui uma potência de 304 hp a 2100 rpm, e torque de 1.095 N.m a 1650 rpm.

Figura 17 - Motor Diesel V8



Fonte: Acervo do autor, 2024.

A Caixa de Marcha, Figura 18, também aproveitada do inventário da BRASERV, responsável pela transmissão e controle da rotação gerada pelo motor diesel. Ela ajusta a velocidade de rotação da bomba triplex a partir do movimento do motor, dessa forma o operador consegue variar a vazão e pressão de descarga da bomba triplex.

A caixa possui seis marchas, com cinco velocidades e a ré, que foi isolada para evitar o ciclo reverso da bomba triplex, que poderia danificar severamente o equipamento.

Figura 18 - Caixa de Marchas



Fonte: Acervo do autor, 2024.

O Eixo Cardan, conforme a Figura 19 abaixo, outro componente proveniente do inventário da BRASERV e adaptado para o projeto, é responsável por transmitir a rotação da caixa de marcha para a bomba triplex. Sua flexibilidade e resistência garantem uma operação suave e contínua do sistema de bombeamento.

Figura 19 - Eixo Cardan

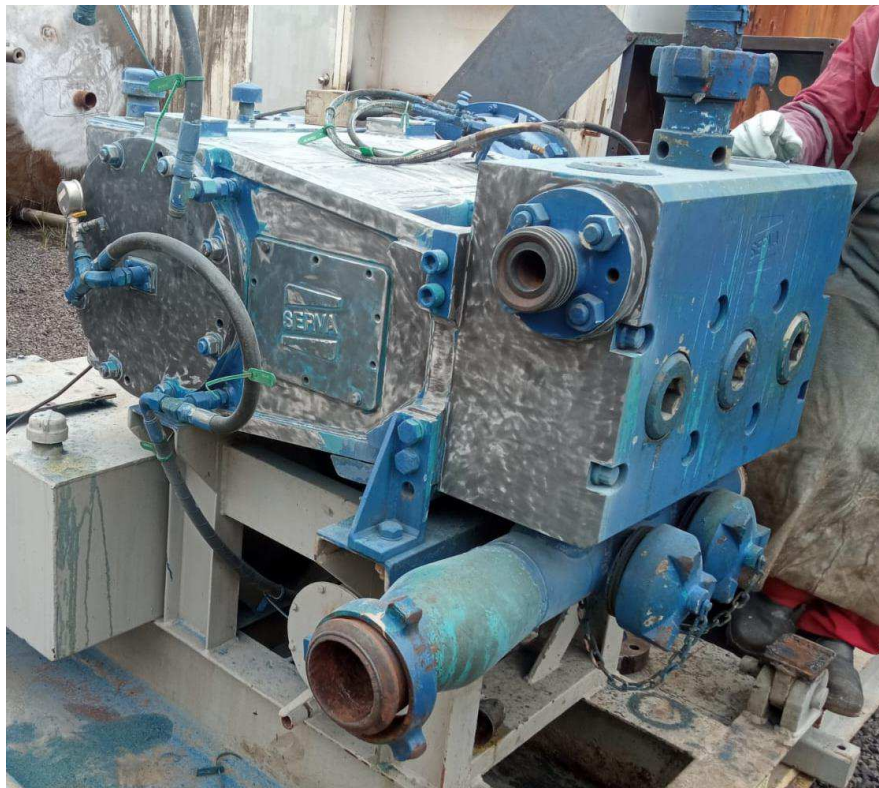


Fonte: Acervo do autor, 2024.

Por fim, a Bomba Triplex, também aproveitada do inventário da BRASERV e adaptada para o projeto da UC-01, é o coração do subsistema de bombeio. Pressuriza e bombeia a pasta de cimento para o poço, ilustrada na Figura 8 a seguir.

A bomba triplex tem capacidade de bombeio de 104 litros por minutos (lpm) a uma pressão máxima de 15.000 psi, e, vazão máxima de 938 lpm a uma pressão de 3.740 psi.

Figura 20 - Bomba Triplex



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Esses elementos, integrados de forma eficiente, asseguram um subsistema de bombeio confiável e preciso, com capacidade de bombeio muito superior ao requerido para as operações, o que garante segurança e tranquilidade quanto ao stress do subsistema durante o funcionamento.

4.1.2 Subsistema 2: Sistema Hidráulico

O Subsistema Hidráulico desempenha um papel fundamental no funcionamento dos sistemas da Unidade de Cimentação UC-01, sendo responsável

pelo acionamento de diversos componentes dos demais subsistemas. O conjunto hidráulico é composto por seis elementos essenciais, cada um contribuindo para garantir o funcionamento de todas as etapas da operação:

A Figura 9 apresenta o motor a diesel dedicado ao subsistema hidráulico, é um motor industrial estacionário de 6.6L turboalimentado, que foi selecionado do inventário de equipamentos da BRASERV. Dentro das opções disponíveis no inventário da empresa, o motor de 6.6 L selecionado tem potência mais que necessária para acionar os componentes hidráulicos.

Pequenos ajustes foram feitos, como a construção de um skid, ou base, para movimentação e proteção do motor, e a confecção de uma peça para conexão com o eixo da bomba hidráulica de pistões, que é acionada pelo volante do motor. Esta configuração libera as polias da frente o motor para acionamento de outros componentes através de correias.

Figura 21 - Motor diesel 6.6L



Fonte: Acervo do autor, 2024.

A bomba hidráulica de pistões axiais é uma bomba de deslocamento variável, com o máximo de 55cc, possui pressão máxima de trabalho de 500 bar. Possui integrados em sua carcaça, um filtro de óleo e uma válvula solenoide que controla o fluxo de óleo da descarga. A bomba de deslocamento variável é dedicada exclusivamente ao acionamento do motor hidráulico de pistões axiais.

Para o acionamento dos demais componentes do subsistema hidráulico, a bomba de deslocamento variável conta com um slot de expansão em sua face traseira,

por onde pode ser conectada uma segunda bomba. Esse slot conecta o eixo das duas bombas, transmitindo o movimento de uma para a outra, o que transforma a bomba de deslocamento variável um componente acionador da nova bomba conectada em sua carcaça.

No slot de expansão, foi adicionada uma bomba de engrenagens, com deslocamento de 14,2 cm³ por rotação, e uma pressão de trabalho de 250 bar. Esta bomba de engrenagens, mais simples e menos robusta é dedicada ao acionamento do motor orbital.

Figura 22 - Bombas hidráulicas já anexadas pelo slot de expansão



Fonte: Acervo do autor, 2024.

A Figura 22 apresenta a bomba de deslocamento variável com a carcaça preta, e ao seu fundo, circulado em vermelho, a bomba de engrenagens, já anexada através do slot de expansão.

A Figura 23 demonstra a bomba de engrenagens apresentada individualmente.

Figura 23 – Bomba de engrenagens.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

O motor hidráulico de pistões axiais possui deslocamento fixo, com velocidade máxima de operação de 4.500 rpm, e pressão máxima suportada de 500 bar. É acoplado na bomba centrífuga do subsistema de mistura, sua seleção foi pensada avaliando seu torque de 196 Nm, capaz de ativar satisfatoriamente a bomba centrífuga nas condições necessárias para a operação.

O acionamento do motor é feito exclusivamente pela bomba de deslocamento variável, desta forma, as características de funcionamento motor hidráulico são compatíveis para suportar o regime de trabalho mais exigente da bomba acionadora.

O motor orbital foi selecionado devido ao seu alto torque, 1.000 rpm, e baixa rotação. Com a função de girar o eixo e as pás do agitador, que vão manter a pasta de cimento de alta viscosidade em movimento, a força do motor foi a característica mais importante na escolha do componente. Seu acionamento é feito bomba de engrenagens, e sua velocidade de rotação é controlada por uma válvula reguladora de vazão.

A Figura 24 mostra os motores hidráulico de pistões, a esquerda, e o motor orbital a direita.

Figura 24 - Motores Hidráulicos de Pistões e Orbital



Fonte: Acervo do autor, 2024

A Válvula Reguladora de Vazão, comanda a velocidade de giro do agitador através do controle do fluxo de óleo para o motor orbital. Com uma alavanca graduada, é possível escolher a porcentagem de óleo que é destinada da bomba de engrenagens ao orbital, enquanto a parcela de óleo do by-pass é enviada até a linha de retorno ao tanque. Com vazão máxima de 114 l/min, a válvula é apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Válvula Reguladora de Vazão



Fonte: Acervo do autor, 2024

4.1.3 Subsistema 3: Sistema De Mistura

O Subsistema de Mistura desempenha o papel de preparar a pasta de cimento de forma homogênea e adequada para as operações de cimentação. Este subsistema é composto por quatro elementos principais: Tanque de mistura, tanque de deslocamento, bomba centrífuga e agitador.

O tanque de Mistura, ilustrado na Figura 26, foi fabricado por meio do processo de corte e solda, utilizando chapas de metal com $\frac{1}{4}$ " de espessura, o tanque de mistura foi dimensionado para atender aos parâmetros de operação da UC-01. A equipe de soldadores executou o trabalho, utilizando discos de corte e eletrodos revestidos. As dimensões foram cuidadosamente calculadas para garantir a capacidade ideal de mistura.

Figura 26 - Tanque de Mistura



Fonte: Acervo do autor, 2024

O tanque de deslocamento, que é similar ao tanque de mistura e foi fabricado pela mesma equipe, utilizando o processo de corte e solda e materiais semelhantes, conforme a Figura 27. Suas dimensões também foram calculadas para atender aos requisitos operacionais da UC-01.

Figura 27 - Tanque de Deslocamento



Fonte: Acervo do autor, 2024

A bomba centrífuga, aproveitada do inventário de equipamentos da BRASERV, possui características técnicas superdimensionadas em relação a necessidade real de projeto. A capacidade extra se mostrou um ponto positivo ao fim da construção, para fins de pré carga da pasta de cimento para o sistema de bombeio, diminuindo a exigência de potência da bomba triplex.

Duas características importantes da bomba centrífuga são:

- Rotor semiaberto: ideal para fluidos viscosos, evita entupimentos e através das palhetas traseiras alivia a pressão na caixa de engaxetamento.
- Carcaça concêntrica: reduzindo turbulência e cavitação, diminuindo vibrações e aumentando a vida útil da carcaça.

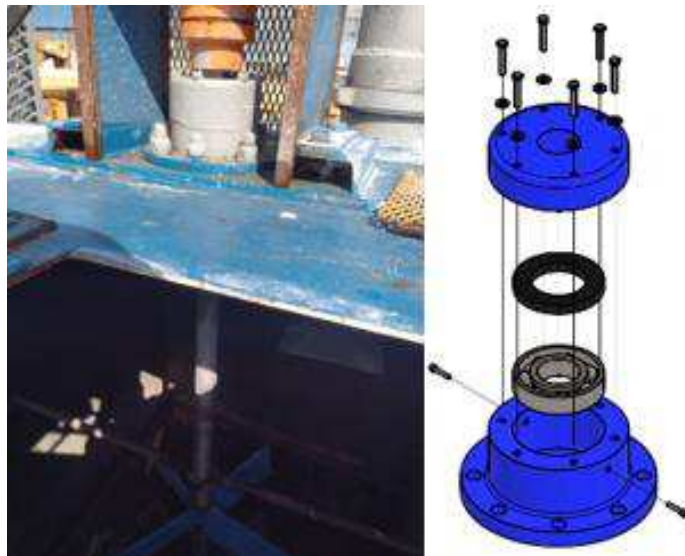
Devido ao projeto da UC-01 dispor de apenas uma bomba centrífuga, sua seleção passou pela durabilidade e capacidade de realizar as operações sem grande esforço em sua estrutura.

Figura 28 - Bomba Centrífuga

Fonte: Acervo do autor, 2024

O agitador é composto por um mancal de fabricação própria. Os rolamentos do mancal foram selecionados com as mesmas dimensões dos rolamentos da bomba centrífuga, de forma a criar um estoque de manutenção otimizado ao intercambiar os rolamentos de dois componentes.

Conectado ao mancal, há um eixo longo usinado na oficina mecânica da empresa. A Figura 29 mostra a esquerda o mancal e a haste com o acoplamento que os conecta ao motor orbital, e à direita, o desenho do mancal em AutoDesk Inventor, para guiar a fabricação da peça.

Figura 29 – Mancal do agitador

Fonte: Acervo do autor, 2024

As pás que são fixadas na haste são confeccionadas com chapas de aço, foram modeladas com base na geometria do agitador do Batch-Mixer Offshore, ou BM-01, um equipamento da própria BRASERV Petróleo. Essa abordagem permitiu reproduzir parcialmente um design já utilizado em equipamento similar, e que se mostrou eficaz em operações de tamponamento offshore, que são mais exigentes quanto aos parâmetros de operação se comparados aos parâmetros previstos para a UC-01.

Devido a diferença no volume de mistura de pasta entre os dois equipamentos, o agitador da UC-01 foi propositalmente simplificado, uma vez que a diferença de peso de pasta permite um design menos robusto das pás. Neste contexto, elementos de reforço que estão presentes no agitador do BM-01 foram descartados na construção do agitador da UC-01.

Figura 30 – Haste do agitador, BM-01 (esquerda), e UC-01 (direita).



Fonte: Acervo do autor, 2024

Em conjunto, esses elementos formam um subsistema de mistura robusto e eficiente, capaz de garantir a preparação adequada da pasta de cimento para as operações de cimentação na UC-01.

4.1.4 Subsistema 4: Sistema Pneumático

O Subsistema Pneumático desempenha o papel de transporte de matéria prima na Unidade de Cimentação UC-01, sendo responsável por gerar a pressão necessária para o transporte pneumático do cimento em pó durante as operações de cimentação. Este subsistema é composto por três elementos principais:

Compressor, este componente, originalmente parte de um desgaseificador, foi aproveitado do inventário de equipamentos da BRASERV e submetido a manutenção antes de ser incorporado ao subsistema pneumático da UC-01. O compressor desempenha o papel fundamental de gerar ar comprimido para alimentar o sistema pneumático.

Figura 31 – Compressor de ar.



Fonte: Acervo do autor, 2024

Silo de Cimento, foi adaptado a partir de um tanque anteriormente utilizado como tanque de mistura em uma indústria de produtos químicos, o silo de cimento passou por um processo de adaptação por solda e caldeiraria, ilustrado na Figura 32. Esse processo envolveu a redução do volume do tanque, a instalação de uma boca de visita, a adequação da base de fixação e a abertura de entradas para ar comprimido e descarga de cimento. A solda eletrodo revestido e a solda TIG foram utilizadas para garantir a integridade e eficácia do silo adaptado.

Figura 32 - Silo de Cimento

Fonte: Acervo do autor, 2024

Balão de Derivação, que foi confeccionado por meio de solda e caldeiraria, é composto por um tubo de 4", chapas de aço e niples soldados para distribuir o ar comprimido do compressor para diferentes mangueiras independentes, conforme ilustrado na Figura 33. Esse componente é importante para garantir uma distribuição eficiente do ar comprimido dentro do sistema pneumático.

Uma outra função do balão de derivação, é conectar uma linha de ar do compressor até o pulmão do motor diesel do subsistema de bombeio. Uma vez que o a partida do motor diesel v8 é realizada por motor de partida pneumático, o vaso de pressão que libera ar para o arranque precisa estar cheio, e graças ao balão de derivação, o vaso de pressão (ou pulmão) do motor pode ser alimentado pelo próprio compressor.

Figura 33 - Balão de Derivação

Fonte: Acervo do autor, 2024

Em conjunto, esses elementos formam um subsistema pneumático robusto e eficiente, capaz de fornecer a pressão necessária para o transporte pneumático do cimento em pó durante as operações de cimentação na UC-01.

4.2 MATRIZ DE INTEGRAÇÃO DOS PROCESSOS

4.2.1 Compra

No desenvolvimento da Unidade de Cimentação UC-01, vários componentes foram adquiridos através do processo de compra. Esta estratégia foi adotada levando em consideração diversos fatores, como a falta de capacidade para fabricação própria, custos elevados de produção, tempo extenso de fabricação, entre outros aspectos.

Equipamentos utilizados a partir do inventário da Braserv, foram considerados como Compra para efeito da matriz. Pois, estes materiais mesmo fora de operação e sem cumprir função de backup para manutenção, foram adquiridos no passado, ainda que sem a intenção de utilização na UC-01.

Entre os componentes adquiridos por meio do processo de compra estão:

- A caixa de marcha, compra direta foi a opção mais viável devido à complexidade técnica e ao tempo necessário para desenvolver internamente.
- O eixo cardan, responsável por transmitir a rotação da caixa de marcha para a bomba triplex, foi adquirido diretamente de fornecedores externos devido à sua especificidade técnica e à falta de condições para sua fabricação interna.
- O motor diesel de 6 cilindros, foi selecionado como a melhor opção de compra devido à sua complexidade técnica e à necessidade de integração perfeita com os demais componentes do sistema.
- A bomba de pistões axiais, foi adquirida diretamente de fornecedores externos para garantir sua qualidade e desempenho, além de reduzir o tempo de desenvolvimento do projeto.

- Tanto o motor hidráulico quanto o motor orbital, foram adquiridos por meio de compra direta devido à sua complexidade técnica e à falta de capacidade para sua fabricação interna.
- A bomba de engrenagens, foi adquirida através de fornecedores externos devido à sua especificidade técnica e à falta de recursos internos para sua fabricação.
- A válvula reguladora de vazão, foi adquirida diretamente de fornecedores externos para garantir sua precisão e eficiência operacional.
- A bomba centrífuga, foi selecionada para compra direta devido à sua complexidade técnica e à necessidade de integração perfeita com os demais componentes do sistema.
- O compressor, foi adquirido diretamente de fornecedores externos devido à sua especificidade técnica e à falta de condições para sua fabricação interna.

Embora não seja possível divulgar os valores e os fornecedores dos produtos devido a questões de segurança de informações internas da empresa, cada aquisição foi cuidadosamente avaliada levando em consideração a qualidade, a confiabilidade e a eficiência operacional dos componentes.

4.2.2 Adaptação

O processo de adaptação foi necessário para dois componentes essenciais do sistema: o motor diesel V8 e a bomba triplex. Esses componentes, embora disponíveis no mercado, não estavam totalmente alinhados com os requisitos específicos do projeto da UC-01.

No caso do motor diesel V8, foi identificada a necessidade de ajustes para garantir sua integração perfeita com o sistema de bombeio. Dada a complexidade técnica e os requisitos específicos de operação da UC-01, a adaptação foi considerada a melhor abordagem.

Da mesma forma, a bomba triplex também passou pelo processo de adaptação para atender às necessidades do sistema de bombeio. Embora a adaptação tenha

sido necessária, os detalhes específicos das modificações realizadas são limitados por questões de segurança de informações internas da empresa.

Embora as informações sobre os detalhes específicos das adaptações sejam limitadas por motivos de segurança de informações internas da empresa, foram necessários ajustes mecânicos e elétricos, realizados para otimizar o desempenho e a eficiência do motor, originalmente para uso offshore, dentro do contexto do projeto da UC-01.

4.2.3 Cópia

O processo de cópia foi aplicado ao componente conhecido como agitador. Esta abordagem envolveu a fabricação de uma réplica do agitador com base em soluções já existentes no mercado. Vários fatores foram considerados ao optar pela cópia deste componente, incluindo a disponibilidade limitada do agitador original no mercado, prazos de entrega de fornecedores e os custos associados à compra, impostos e transporte.

A cópia do agitador foi uma escolha estratégica para evitar complicações associadas à aquisição do componente original, bem como para assegurar que o sistema de mistura da UC-01 fosse equipado com um componente de qualidade, capaz de cumprir eficazmente sua função durante as operações de cimentação.

4.2.4 Desenvolvimento

Para atender às necessidades específicas do projeto da Unidade de Cimentação UC-01, foram desenvolvidos internamente pela equipe de manutenção alguns componentes essenciais que não estavam disponíveis no mercado. Essa etapa de desenvolvimento foi crucial para garantir a integração perfeita e o desempenho ideal do sistema como um todo.

Os componentes desenvolvidos internamente incluem o tanque de mistura, o tanque de deslocamento, o silo de cimento e o balão de derivação. Cada um desses componentes foi customizado para atender às especificidades do projeto da UC-01, levando em consideração requisitos técnicos, operacionais e de desempenho.

Foi realizado um extenso trabalho de engenharia, com utilização extensa de ferramentas CAD e CAE, para garantir que esses componentes atendessem aos parâmetros de operação e requisitos do projeto.

O desenvolvimento interno desses componentes foi uma abordagem estratégica para superar a falta de opções disponíveis no mercado e garantir que a UC-01 estivesse equipada com sistemas robustos e eficientes.

4.3 RESULTADO FINAL

A construção da Unidade de Cimentação UC-01 foi finalizada em março de 2024, com período de testes efetuado em abril. Durante a primeira bateria de testes, todos os subsistemas foram submetidos a carga de trabalho referente ao requisitado para operação, com 3.500 psi de pressão de bombeio. Na segunda bateria de testes o equipamento foi submetido a carga de trabalho superior, com pressão de bombeio de 5.000 psi.

As baterias de testes foram realizadas na base, com linha de bombeio mista, composta por linhas de aço de 2 polegadas figura 1502 (suportam até 15.000 psi), e mangueira flexível de 2 polegadas, com extremidade livre. Essa configuração de teste corresponde a simulação para cimentação de abandono, estes poços normalmente já passam por intervenções de alívio de pressão, e, portanto, não apresentam contrapressão relevante durante a cimentação dos tampões.

Ao fim da bateria de testes, foi constatado que todos os componentes, demonstraram eficiência e confiabilidade, atendendo plenamente aos requisitos técnicos e operacionais estabelecidos para o projeto, resultando no equipamento pronto, conforme a Figura 19.

Figura 34 - Unidade de Cimentação UC-01 Finalizada



Fonte: Acervo do autor, 2024

5 CONCLUSÃO

A construção da Unidade de Cimentação UC-01, demonstra o sucesso durante o desenvolvimento do projeto a partir da metodologia de integração. As condições de projeto, como baixa experiência e número reduzido de membros da equipe, aliados ao prazo de construção e orçamento enxuto demonstraram ser grandes obstáculos vencidos através do gerenciamento de projeto de máquinas.

A integração metodológica adotada desempenhou um papel fundamental nessa conquista, proporcionando uma visão concisa dos processos macro e detalhando os passos em todas as fases de construção, montagem, manutenção e operação.

Ao longo do desenvolvimento da UC-01, as abordagens de compra direta, adaptação, cópia e desenvolvimento foram cuidadosamente avaliadas para garantir eficácia e eficiência. A estratégia de compra direta foi selecionada para componentes complexos, enquanto adaptações foram feitas quando necessário. A decisão de copiar um agitador representou uma escolha estratégica para garantir qualidade e evitar complicações na aquisição do componente original. Além disso, o desenvolvimento interno de componentes específicos demonstrou a capacidade de resolução de problemas e pensamento inovador da equipe, ao desenvolver em um curto espaço de tempo soluções personalizadas e eficientes.

A UC-01 não apenas atende às expectativas de desempenho, confiabilidade e eficiência, mas também representa um marco no avanço tecnológico do setor, ao propor uma nova abordagem para um serviço tão necessário na intervenção de poços de petróleo.

O desenvolvimento da primeira Unidade de Cimentação, representa uma entrada sólida e competitiva no setor de cimentação, com grandes expectativas de crescimento. Este trabalho não apenas contribui para o conhecimento técnico-científico na área, mas também para a divulgação da importância de aplicação das técnicas de projeto de máquinas em demandas de mercado muito desafiadoras, assim provando do maior desafio e da maior dívida da engenharia: transformar ideias em soluções.

REFERÊNCIAS

- ACHANG, M.; YANYAO, L.; RADONJIC, M. A Review of Past, Present, and Future Technologies for Permanent Plugging and Abandonment of Wellbores and Restoration of Subsurface Geologic Barriers. **Rev. ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE**. v. 37, n. 6, p. 395-408. Jan, 2020.
- ALMEIDA, F. B.; JUNIOR, J. R. S. P.; MACHADO, L. C. ESTUDO DOS PROCEDIMENTOS E NORMAS DE ABANDONO E CAUSAS DE ACIDENTES POR FALHAS NA CIMENTAÇÃO DOS POÇOS DE PETRÓLEO. **Rev. Ciências exatas e tecnológicas**. v. 3, n. 3, p. 51-62. Out, 2016.
- ARAÚJO, R. G. S. **USO DA CINZA DA CASCA DO ARROZ EM TAMPÕES DE CIMENTO PARA ABANDONO DE POÇOS PETROLÍFEROS**. UFRN. CCET. Tese. 2020.
- BEZERRA, U. T. **COMPÓSITOS PORTLAND-BIOPOLÍMERO PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**. UFRN. CCET. Tese. 2006.
- FURTADO, R. **Abandono permanente de poços de petróleo no Brasil: dados, motivações, SGIP ANP e melhores práticas da indústria**. LINKEDIN. 2018. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/o-abandono-permanente-de-poços-petróleo-brasil-dados-sgipanp-furtado>. Acesso em 10 de abr de 2024.
- Júnior Amorim, Wanderley Ferreira. **Metodologia de Integração**. Notas de Aulas da disciplina de Máquinas de Elevação e Transporte. Curso Engenharia Mecânica/ CCT/UFCG. 2023.
- SOUZA, H. M. A. C.; CARVALHO, P. A.; FILHO, J. C. F. NORMAS DE ABANDONO E ACIDENTES CAUSADOS POR CIMENTAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO. **Rev. Ciências exatas e tecnológicas**. v. 4, n. 2, p. 111-118. Out, 2017.
- SOUZA, H. M.; VELOSO, A. UTILIDADE DO REVESTIMENTO E DA CIMENTAÇÃO NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA. **Rev. Ciências exatas e tecnológicas**. v. 4, n. 2, p. 11-24. Out, 2017.