



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**CRISTIAN ROBERTO DA MATA**

# **Potência Hidráulica como Indicador de Qualidade da Cimentação Primária**

CAMPINAS  
2021

**CRISTIAN ROBERTO DA MATA**

# **Potência Hidráulica como Indicador de Qualidade da Cimentação Primária**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo na área de Exploração.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim Mendes

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO CRISTIAN ROBERTO DA MATA, E ORIENTADO PELO PROF. DR JOSÉ RICARDO PELAQUIM MENDES.

**CAMPINAS  
2021**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M41p Mata, Cristian Roberto da, 1975-  
Potência hidráulica como indicador de qualidade da cimentação primária /  
Cristian Roberto da Mata. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: José Ricardo Pelaquim Mendes.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade  
de Engenharia Mecânica.

1. Poços de Petróleo - Cimentação. 2. Hidráulica. 3. Qualidade. 4. Pré-sal.  
I. Mendes, José Ricardo Pelaquim, 1971-. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Hydraulic power as quality indicator of the primary cementing

**Palavras-chave em inglês:**

Oil wells - Cementing

Hydraulic

Quality

Pre-salt

**Área de concentração:** Exploração

**Titulação:** Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

**Banca examinadora:**

Marcelo Souza de Castro

Marcos Antônio Rosolen

Ronaldo Carrion

**Data de defesa:** 23-12-2021

**Programa de Pós-Graduação:** Ciências e Engenharia de Petróleo

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-1422-9944>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8036209291314969>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Potência Hidráulica como Indicador de  
Qualidade da Cimentação Primária**

Autor: Cristian Roberto da Mata

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim Mendes.

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Marcelo Souza de Castro, Presidente  
DEP / FEM / Unicamp**

**Prof. Dr. Marcos Antônio Rosolen, Membro Interno  
DEP / FEM / Unicamp**

**Prof. Dr. Ronaldo Carrion, Membro Externo  
PMI / POLI / USP**

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 23 de dezembro de 2021.

## **Dedicatória**

Este trabalho é dedicado a todos os mestres que se sucederam e estão no porvir ao longo de minha infinda jornada como aprendiz, àqueles que muito contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e minha formação profissional. Em especial, dedico este trabalho a memória póstuma do estimado mestre e amigo Prof. Dr. Kazuo Miura que exerceu com zelo, paciência e dedicação a mais nobre das atividades humanas: a arte de transferir o conhecimento nos instruindo sendo por meio de suas aulas, das atividades práticas e, sobretudo, através do seu exemplo de vida.

## Agradecimentos

À glória do grande Arquiteto do Universo, agradeço por desfrutar de boa saúde e pela oportunidade de me dedicar à realização deste trabalho; aos meus familiares pela companhia e compreensão; aos poucos e bons amigos por nossas conversas frugais e inspiradoras; ao Baruch, meu fiel e leal companheiro canino pelas caminhadas vespertinas que tanto contribuíram para desanuviar a mente e revigorar os pensamentos.

Agradeço aos membros da equipe do grupo de pesquisa Lighthouse; pela orientação e coordenação magistral do Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim; ao Marcelo, Nelson e Amanda, sempre disponíveis para ao debate semanal de ideias, pelas inúmeras contribuições, sugestões e revisões técnicas.

Agradeço a Petrobrás pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa sobre o tema integridade de poços e a todos os seus colaboradores que nos receberam em seus locais de trabalho, em especial ao Eng. Danilo Colombo que nos abriu as portas da empresa para que pudéssemos aprender com os melhores.

Agradeço a FEM-UNICAMP, aos professores do programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia do Petróleo que lecionaram suas aulas em instalações tão bem mantidas e organizadas pelos prestimosos funcionários; à Secretaria de Pós-Graduação pelo pronto atendimento e esclarecimentos; aos colaboradores do CEPETRO pela gestão financeira e administrativa do projeto.

Ao meu pai Luís Roberto da Mata (in memoriam) por me criar, educar e tornar-me um homem responsável, e ao Prof. Dr. Kazuo Miúra (in memoriam) pela gênese e inspiração deste trabalho, minha eterna gratidão.

Ao Brasil e sua nação por proporcionar toda minha educação acadêmica pública e de qualidade, e pela herança cultural da qual me faz, com muito orgulho, ser um brasileiro. Que Deus nos ilumine e guarde a todos.

*“Erros são, no final das contas, fundamentos da verdade.  
Se um homem não sabe o que uma coisa é,  
já é um avanço do conhecimento saber o que ela não é.”*

***Carl Jung (1875-1961)***

## Resumo

Nas operações de cimentação primária, para que o cimento seja distribuído ao longo da extensão planejada, cálculos quanto ao volume deslocado, colchões de lavagem, densidades, entre outros, bem como fatores operacionais como vazão de deslocamento e pressão dinâmica, são primordiais para uma operação bem sucedida cuja integridade na condição de elemento de barreira deverá ser comprovada após testes de pressão e, posteriormente, após corrida dos perfis sônicos. Contudo, o tempo dispendido em *wait on cement* incorre em improdutividade e custos adicionais possivelmente evitáveis tratando-se dos encargos de afretamento de uma plataforma de exploração marítima, daí o interesse em abreviar esse período e assim permitir a antecipação dos trabalhos ou a adoção diligente de operações de remediação.

Este trabalho apresenta uma proposta inovadora ao analisar o histórico de dados operacionais da cimentação primária do revestimento de produção em formação permeável de poços perfurados nos campos do pré-sal brasileiro. O objetivo posto foi desenvolver uma metodologia para o cálculo e classificação do Indicador de Qualidade da Cimentação -IQC- obtido através da diferença de potência hidráulica aplicada no deslocamento da pasta de cimento logo após o término da operação. Os resultados obtidos apresentaram uma correlação consistente ao compararmos os IQCs de um conjunto de poços e suas avaliações de perfil sônico (CBL/VDL) correspondente, conforme os critérios de classificação da operadora brasileira. Ao final, corroborados pela classificação dos perfis sônicos, os poços que apresentaram indicador de qualidade acima de 0,68 foram considerados satisfatórios no que concerne ao desempenho operacional da cimentação primária, enquanto que poços com indicador de qualidade abaixo de 0,36 apresentaram um desempenho deficiente.

**Palavras-chave:** cimentação primária, integridade de poços, potência hidráulica, indicador de qualidade.

## Abstract

In primary cementing operations, in order to achieve a proper deployment along the intended extension, calculations regarding the displaced volume, flushes, spacers, densities, among others, as well as operational parameters such as flow rate and dynamic pressure, are of utmost importance for a well succeed operation whose integrity as a barrier element can be attested by pressure tests and sonic logging profiles afterwards. Nevertheless, the waiting on cement lasting for days incur in non-productive time adding costs that would be likely avoided considering the daily affreightment charges of an off shore exploration rig, so it is of great interest to shorten this time and thus allowing to work in advance or to take diligent remedial actions.

Hereby this proposal presents a novel usage of the historic operational data of the primary cementing production's casings collected through a cluster of wells drilled into permeable formation over the Brazilian pre-salt province. The defined objective is to provide a methodology to calculate and classify the Quality Indicator of Cementing -QIC- by means of the hydraulic horse power right after the deployment of the cement slurry. The results presented a consistent correlation while comparing the QICs of a group of wells and its respective sonic profiles (CBL/VDL) according to the local operator's criteria. At the end, supported by the sonic profiles, wells presenting quality indicator above 0,68 were considered satisfactory concerning the operational performance of the primary cementing, whereas wells with quality indicator below 0,36 presented deficient performance.

**Keywords:** primary cementing, well integrity, hydraulic power, quality indicator.

## Lista de Ilustrações

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Possíveis caminhos de fluxo (fonte: Da Fonseca, 2012). .....                                                                  | 19 |
| Figura 1.2: Exemplo ilustrativo do CSB ao longo da vida do poço .....                                                                     | 20 |
| Figura 1.3: Perda de integridade por categoria de falha (adaptado de Al Alwad, 2016). .....                                               | 22 |
| Figura 1.4: Poço Aberto de Completação Inteligente (PACI) vs. Poço Convencional (fonte: do autor).....                                    | 23 |
| Figura 2.1: Fatores de influência no sucesso da operação de cimentação primária .....                                                     | 26 |
| Figura 2.2: Perfis de escoamento da pasta de cimento (adaptado de Khalifeh e Saasen, 2020).<br>.....                                      | 27 |
| Figura 2.3: Formação e perda de circulação (fonte: Alkinani et al., 2019). .....                                                          | 30 |
| Figura 2.4: Canalização e assinatura operacional (adaptado de Beirute, 1988). .....                                                       | 34 |
| Figura 2.5: Perda de circulação e assinatura operacional (adaptado de Beirute, 1988). .....                                               | 35 |
| Figura 2.6: Restrições de fundo do poço (adaptado de Beirute, 1988). .....                                                                | 36 |
| Figura 2.7: Deslocamento da programação de bombeamento com perdas dinâmicas e sem<br>perdas dinâmicas (fonte: Dooply et al., 2019). ..... | 37 |
| Figura 2.8: Log Display (fonte Gomes et al., 2017). .....                                                                                 | 38 |
| Figura 3.1: Principais configurações de poços do pré-sal, fases e revestimentos (adaptado de<br>Gregatti et al., 2015). .....             | 40 |
| Figura 3.2: Unidade de cimentação tipo “skid” .....                                                                                       | 42 |
| Figura 3.3 Componentes e acessórios de cimentação.....                                                                                    | 43 |
| Figura 3.4 BHA para cimentação primária.....                                                                                              | 46 |
| Figura 3.5 Perfil Sônico de Cimentação.....                                                                                               | 47 |
| Figura 4.1: Deslocamento e pressões na coluna e anular do poço .....                                                                      | 49 |
| Figura 4.3 Dispersão para IQC sem limite superior. ....                                                                                   | 62 |
| Figura 4.2 Dispersão para IQC com limite superior. ....                                                                                   | 62 |
| Figura 4.4: Gradiente cromático do IQC para o conjunto de poços analisados. ....                                                          | 63 |
| Figura 4.5: Distribuição dos poços e os campos produtores .....                                                                           | 64 |
| Figura 4.6: Redistribuição e classificação dos poços ZUC e RAG .....                                                                      | 65 |
| Figura 5.1: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC - ZUC .....                                                        | 67 |
| Figura 5.2: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC -RAC.....                                                          | 68 |
| Figura 5.3: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC unificados.....                                                    | 69 |
| Figura 5.4: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Excelente.....                                                   | 70 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.5 Gradiente Cromático – IQC 0,94 .....                                        | 71 |
| Figura 5.6: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Bom.....      | 71 |
| Figura 5.7 Gradiente Cromático – IQC 0,72 .....                                        | 72 |
| Figura 5.8: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Médios. ....  | 72 |
| Figura 5.9 Gradiente Cromático – IQC 0,68 .....                                        | 72 |
| Figura 5.10: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Ruim.....    | 73 |
| Figura 5.11 Gradiente Cromático – IQC 0,36 .....                                       | 73 |
| Figura 5.12: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Péssimo..... | 74 |
| Figura 5.13 Gradiente Cromático – IQC 0,06 .....                                       | 74 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: CSBs vs. Ciclo de vida do poço (adaptado de Khalifeh e Saasen, 2020).....   | 21 |
| Tabela 2: Exemplo de cálculo da $Ph1$ .....                                           | 51 |
| Tabela 3: Exemplo de cálculo da $Ph2$ .....                                           | 51 |
| Tabela 4: Exemplo de volume e vazão numa cimentação primária da fase de produção..... | 52 |
| Tabela 5: Exemplo das vazões efetivas no topo do cimento .....                        | 54 |
| Tabela 6: Exemplo das velocidades de deslocamento .....                               | 55 |
| Tabela 7: Exemplo do Número de Reynolds .....                                         | 56 |
| Tabela 8: Exemplo da perda de carga por atrito do cimento no anular .....             | 57 |
| Tabela 9: Exemplo da perda de carga por atrito da lama no anular.....                 | 57 |
| Tabela 10: Exemplo das potências hidráulicas de fundo do poço e topo do cimento ..... | 59 |
| Tabela 11: Exemplo de cálculo dos coeficientes de rendimento .....                    | 61 |
| Tabela 12: Reagrupamento dos campos conforme profundidades médias.....                | 66 |
| Tabela 13: Classificação e critérios quanto ao isolamento hidráulico (LIMA,2018)..... | 66 |
| Tabela 14: Classificação, parâmetros, coeficientes e indicadores Grupo ZUC.....       | 67 |
| Tabela 15: Classificação, parâmetros, coeficientes e indicadores Grupo RAG. ....      | 68 |
| Tabela 16: Classificação, parâmetros, coeficientes e indicadores unificados. ....     | 69 |

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

|        |                                                             |
|--------|-------------------------------------------------------------|
| ANP    | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| API    | American Petroleum Institute                                |
| BHP    | Bottom Hole Pressure                                        |
| BOP    | Blowout Preventer                                           |
| CBL    | Casing Bond Logging                                         |
| CSB    | Conjunto Solidário de Barreiras                             |
| DHSV   | Down Hole Safety Valve                                      |
| ECD    | Equivalent Circulating Density                              |
| ECP    | External Casing Packer                                      |
| FIT    | Formation Integrity Test                                    |
| LCM    | Loss Control Material                                       |
| LOT    | Leak of Test                                                |
| MPC    | Monitored Pressured Cement                                  |
| MPD    | Monitored Pressure Drilling                                 |
| MWD    | Measure While Drilling                                      |
| NORSOK | Norwegian Standards Organization                            |
| PIS    | Pressure Indicator Systems                                  |
| ROV    | Remote Operation Vehicles                                   |
| SCP    | Sustaining Casing Pressure                                  |
| SGIP   | Sistema de Gestão de Integridade de Poço                    |
| TOC    | Top of Cement                                               |
| VDL    | Variable Density Logging                                    |

## Lista de Símbolos

|              |                                                             |
|--------------|-------------------------------------------------------------|
| $Cap_a$      | Capacidade do anular, 0183 bbl/m                            |
| $D_{bh}$     | Profundidade real do poço, m                                |
| $D_c$        | Diâmetro externo da coluna, in                              |
| $D_p$        | Diâmetro do poço, in                                        |
| $D_{toc}$    | Profundidade real do topo do cimento, m                     |
| $f$          | Fator de atrito adimensional                                |
| $K$          | Índice de consistência                                      |
| $L$          | Extensão da zona cimentada, m                               |
| $L_p$        | Extensão da zona cimentada projetada, m                     |
| $L_f$        | Extensão do fluido no anular, m                             |
| $\tau$       | Limite de escoamento, lbf/100 ft <sup>2</sup> .             |
| $n$          | Índice de comportamento de fluxo                            |
| $n_c$        | Quantidade de fluidos que compõem o programa de bombeamento |
| $P$          | Pressão, psi                                                |
| $P_b$        | Pressão da bomba de deslocamento positivo, psi              |
| $P_{bh}$     | Pressão total no fundo poço, psi                            |
| $P_c$        | Pressão hidrostática do cimento, psi                        |
| $P_{flus}$   | Pressão hidrostática do colchão de lavagem, psi             |
| $P_h$        | Pressão hidrostática a determinada profundidade, psi        |
| $P_{hA}$     | Pressão hidrostática do anular na profundidade, psi         |
| $P_{hC}$     | Pressão hidrostática da coluna na profundidade, psi         |
| $P_{h1}$     | Pressão hidrostática do anular no fundo de poço, psi        |
| $P_{h2}$     | Pressão hidrostática do anular no topo do cimento, psi      |
| $P_l$        | Pressão hidrostática da lama, psi                           |
| $P_r$        | Pressão na linha de retorno (choke manifold), psi           |
| $P_{spac}$   | Pressão hidrostática do colchão espaçador, psi              |
| $P_{toc}$    | Pressão total no topo do cimento, psi                       |
| $\Delta P_A$ | Perda de carga no anular, psi                               |
| $\Delta P_C$ | Perda de carga na coluna, psi                               |
| $\Delta P_c$ | Perda de carga do cimento, psi                              |

|                  |                                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $\Delta P_l$     | Perda de carga da lama, psi                                     |
| $Q_b$            | Vazão da unidade de cimentação, bbl/min                         |
| $Q_e$            | Vazão efetiva no topo do cimento, bbl/min                       |
| $Q_p$            | Vazão de perda de cimento, bbl/min                              |
| $Q_v$            | Vazão volumétrica, bbl                                          |
| $Re$             | Número de Reynolds                                              |
| $\dot{W}_h$      | Potência hidráulica, hp                                         |
| $\dot{W}_d$      | Potência dissipada, hp                                          |
| $\dot{W}_u$      | Potência hidráulica útil no topo do cimento, hp                 |
| $\dot{W}_{toc}$  | Potência no topo do cimento, hp                                 |
| $\dot{W}_{bh}$   | Potência hidráulica no fundo do poço, hp                        |
| $\Delta \dot{W}$ | Diferença de potência hidráulica, hp                            |
| $t_b$            | Tempo total de bombeamento do cimento, minutos                  |
| $v_a$            | Velocidade de deslocamento no anular ou interior da coluna, m/s |
| $V_i$            | Corresponde ao volume total do fluido $i$ bombeado, bbl         |
| $\mu_0$          | Viscosidade plástica do fluido, cP                              |
| $V$              | Volume do fluido, bbl                                           |
| $V_{flush}$      | Volume do colchão de lavagem, bbl                               |
| $V_l$            | Volume do fluido de perfuração, bbl                             |
| $V_p$            | Volume de perda de cimento, bbl                                 |
| $V_{spac}$       | Volume do colchão espaçador, bbl                                |
| $V_t$            | Volume total efetivo de cimento bombeado, bbl                   |
| $\eta'$          | Coeficiente de rendimento                                       |
| $\eta_1$         | Coeficiente operacional da cimentação, hp/m                     |
| $\eta_2$         | Coeficiente padrão de cimentação, hp/m                          |
| $\rho$           | Densidade da pasta de cimento, lbm/gal                          |
| $\rho_i$         | Densidade do fluido, lbm/gal                                    |
| $\rho_l$         | Densidade da lama, lbm/gal                                      |
| $\rho_{flush}$   | Densidade do colchão de lavagem                                 |
| $\rho_{spac}$    | Densidade do colchão espaçador                                  |
| $\phi_{300}$     | Rotação do viscosímetro, 300 rpm;                               |
| $\phi_{600}$     | Rotação do viscosímetro, 600 rpm.                               |

## SUMÁRIO

|       |                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....                                                        | 18 |
| 1.1   | Motivações .....                                                       | 21 |
| 1.2   | Objetivos .....                                                        | 24 |
| 1.3   | Estrutura .....                                                        | 24 |
| 2     | REVISÃO DA LITERATURA .....                                            | 25 |
| 2.1   | Fatores de influência na cimentação primária.....                      | 25 |
| 2.2   | Regimes de escoamento na cimentação primária.....                      | 26 |
| 2.3   | Perdas de circulação e materiais de controle de perda .....            | 28 |
| 2.4   | Monitoramento em tempo real da operação .....                          | 30 |
| 2.5   | Assinatura operacional e caracterização do fenômeno.....               | 32 |
| 3     | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                                             | 39 |
| 3.1   | Configuração dos poços produtores .....                                | 39 |
| 3.2   | Programação de bombeamento .....                                       | 40 |
| 3.3   | Equipamentos de cimentação e acessórios.....                           | 41 |
| 3.4   | Etapas da operação de cimentação .....                                 | 44 |
| 3.5   | Testes e avaliação do isolamento hidráulico .....                      | 45 |
| 3.5.1 | Testes Hidráulicos .....                                               | 45 |
| 3.5.2 | Perfis acústicos .....                                                 | 47 |
| 4     | METODOLOGIA .....                                                      | 48 |
| 4.1   | Hidráulica de Cimentação .....                                         | 48 |
| 4.1.1 | Equação da Potência Hidráulica .....                                   | 48 |
| 4.1.2 | Pressão Total no Anular – Hidrostática e Dinâmica.....                 | 49 |
| 4.1.3 | Vazão Efetiva no Topo do Cimento e Vazão de Deslocamento da Bomba..... | 51 |
| 4.1.4 | Pressão Dinâmica e Perdas de Pressão por Atrito .....                  | 54 |
| 4.1.5 | Potência Hidráulica no Fundo do Poço.....                              | 58 |
| 4.1.6 | Potência Hidráulica e Potência Dissipada no Topo do Cimento .....      | 58 |
| 4.1.7 | Indicador de Qualidade da Cimentação IQC .....                         | 60 |

|       |                                                                           |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.8 | Limites Máximo e Mínimo do IQC .....                                      | 61  |
| 4.2   | Coleta de Dados.....                                                      | 63  |
| 5     | RESULTADOS.....                                                           | 67  |
| 5.1   | Aplicação dos Cálculos .....                                              | 67  |
| 5.2   | Análise dos Resultados.....                                               | 70  |
| 5.2.1 | Classificação e análise dos poços Excelentes .....                        | 70  |
| 5.2.2 | Classificação e análise dos poços Bons .....                              | 71  |
| 5.2.3 | Classificação e análise dos poços Médios .....                            | 72  |
| 5.2.4 | Classificação e análise dos poços Ruins .....                             | 73  |
| 5.2.5 | Classificação e análise dos poços Péssimos.....                           | 73  |
| 6     | CONCLUSÃO.....                                                            | 75  |
| 6.1   | Trabalhos Futuros .....                                                   | 76  |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                         | 77  |
|       | APÊNDICE A - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA – EXEMPLO DE CÁLCULO .....          | 83  |
|       | APÊNDICE B – PARÂMETROS OPERACIONAIS E INFORMAÇÕES DE PROJETO DO POÇO. 90 |     |
|       | APÊNDICE C – TABELAS DE DADOS DOS POÇOS E CÁLCULOS.....                   | 92  |
|       | B.1 Poços Campo Zeus .....                                                | 92  |
|       | B.2 Poços Campo Urano .....                                               | 100 |
|       | B.3 Poços Campo Cronos.....                                               | 102 |
|       | B.4 Poços Campo Reia.....                                                 | 103 |
|       | B.5 Poços Campo Apolo .....                                               | 104 |
|       | B.6 Poços Campo Gaia .....                                                | 108 |

# 1 INTRODUÇÃO

A cimentação primária em poços de petróleo tem dois objetivos principais: para os revestimentos condutor e de superfície, o objetivo da cimentação é transferir as cargas geradas no poço para as formações superficiais; para os demais revestimentos das fases subsequentes, o objetivo é isolar hidraulicamente as formações permeáveis encontradas durante a perfuração do poço impedindo a comunicação dessas formações entre si ou com o meio ambiente. Esse isolamento permite que a cimentação seja considerada um elemento efetivo de barreira no espaço anular entre o revestimento e as formações perfuradas, segundo a Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis - ANP (ANP, 2016).

De acordo com a Fredrich et al. (2003) e Seymour et al. (1993) para que a cimentação seja considerada genuinamente um elemento efetivo de barreira, a extensão preenchida do espaço anular deve compreender necessariamente um trecho de formação impermeável ou parte dela (rocha selante ou capeadora). A cimentação, quando considerada um elemento efetivo de barreira, garante o isolamento das formações das fases revestidas, possibilitando, por exemplo, o aumento ou a redução da densidade do fluido de perfuração para a fase seguinte. Garantir os isolamentos hidráulicos nem sempre é uma tarefa fácil, pois é necessário distribuir o cimento em toda a circunferência do anular, impedindo canalizações. Consequentemente, uma cimentação mal realizada poderá ocasionar uma redução na produtividade ou capacidade de injeção de fluidos para a formação, permitindo o fluxo de fluido pelo caminho do anular e diminuindo assim a eficiência do elemento de barreira nesse caminho. Todavia, estudos demonstraram que até 50% dos poços com mais de quinze anos apresentaram *sustained casing pressure* (SCP), pressões acumuladas nos anulares em pelo menos um dos revestimentos (SHADRAVAN; AMANI, 2015) onde possivelmente a cimentação e/ou outro elemento de barreira concorrente tenham falhado. Outro estudo realizado em poços no Golfo do México constatou que 85% dos poços analisados apresentaram pressões no anular do revestimento sendo que em 30% dos casos o anular do revestimento de produção apresentou o incremento da pressão (XU; WOJTANOWICZ, 2001). Inferências foram feitas quanto à qualidade do cimento e sua permeabilidade como possível causa de falha.

Um Conjunto Solidário de Barreiras (CSB) pode ser definido como uma composição predeterminada de um ou mais elementos com o objetivo de impedir o fluxo não intencional de

fluidos da formação para o meio externo (superfície) e entre intervalos no poço, considerando todos os caminhos possíveis garantindo-se assim a integridade do poço (ANP, 2016).

São 4 os caminhos de fluxo indesejados identificados na Figura 1.1, a seguir:

- Interior da coluna de produção, de injeção, de perfuração ou de trabalho;
- Interior do poço ou anular de uma das colunas acima;
- Anulares dos revestimentos já instalados;
- Através das próprias formações.

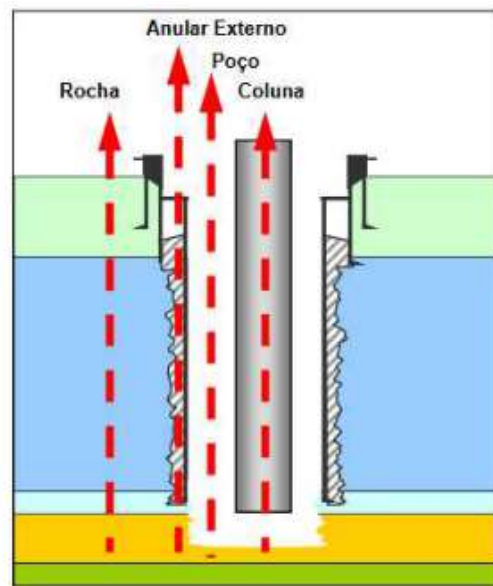


Figura 1.1: Possíveis caminhos de fluxo (fonte: Da Fonseca, 2012).

Garantir que um poço mantenha sua integridade, ou seja, a capacidade de não vazamento ao longo do seu ciclo de vida, impeliu as operadoras a determinarem procedimentos que compuseram o termo Gerenciamento de Integridade de Poços, termo esse definido como sendo a aplicação de soluções operacionais, técnicas e organizacionais que tem como objetivo reduzir os riscos de influxo descontrolado de fluidos da formação, durante todo o ciclo de vida do poço (BRECHAN; SANGESLAND; NAADEN, 2018). Para tanto, garantir a integridade de poços é necessário que existam pelo menos, dois conjuntos solidários de barreiras, que sejam funcionais, durante toda a vida do poço.

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis -ANP- estabeleceu as bases para a implementação do Sistema de Gerenciamento da Integridade de Poços (SGIP) destacando que os elementos que constituem o CSB devem ser definidos antes do início das atividades, para que se estabeleça e verifique se esses se encontram dentro dos critérios de aceitação e monitoramento (ANP, 2016).

Para o elemento de barreira cimento, a ANP o define no subitem 2.5.1 da Resolução 46 de 2016 nos termos abaixo:

CSB Permanente Conjunto cujo objetivo é impedir o fluxo não intencional atual e futuro de fluidos da formação, considerando todos os caminhos possíveis. O CSB Permanente deve estar posicionado numa formação impermeável através de uma seção integral do poço, com formação competente na base do CSB. Cimento ou outro material de desempenho similar (incluindo formações plásticas selantes) devem ser usados como elementos de barreira.

Na fase de construção do poço, o termo Integridade é melhor definido pelo conceito de Segurança Operacional e o SGIP preceitua que, na ocorrência de um incidente operacional, a aplicação do CSB impede que este escale para um acidente.

Pode-se observar na Figura 1.2 que o cimento é o elemento constituinte de qualquer conjunto solidário de barreiras, até mesmo na perfuração, sendo este um elemento testado na sapata da fase anterior e por conseguinte fundamental para a construção da próxima fase com segurança (KHALIFEH; SAASEN, 2020). A Tabela 1.1 descreve os elementos que compõem o CSB em cada uma das fases do ciclo de vida do poço.

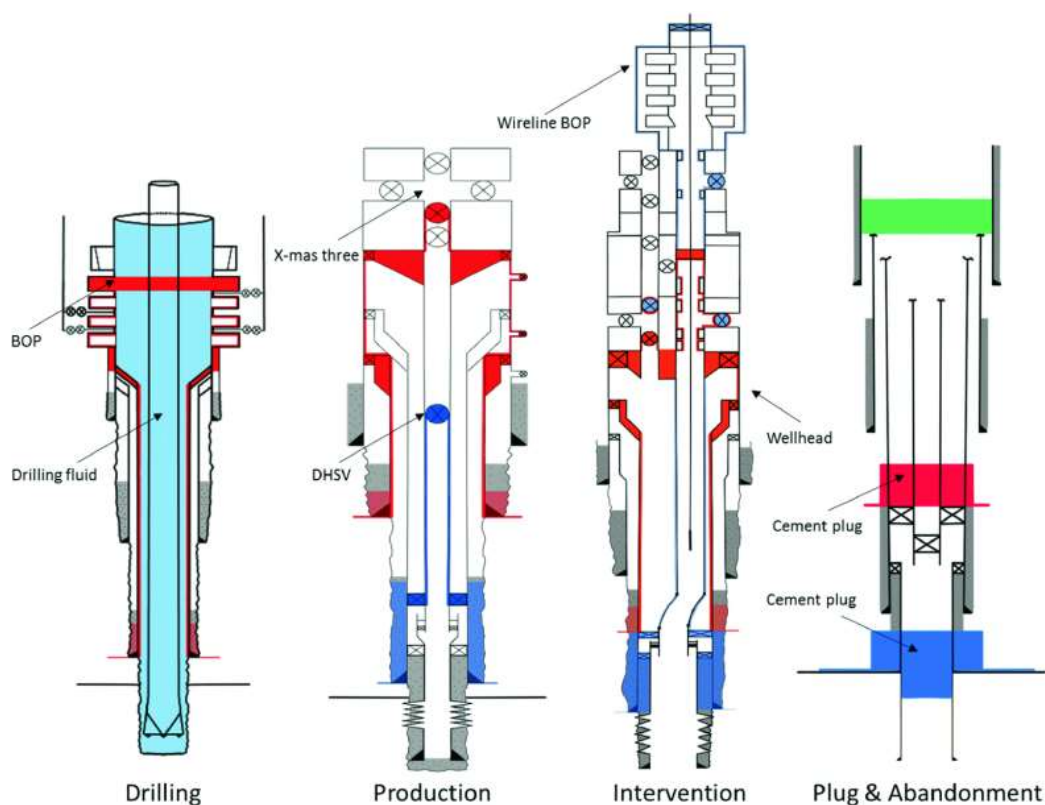


Figura 1.2: Exemplo ilustrativo do CSB ao longo da vida do poço (adaptado de Khalifeh e Saasen, 2020).

Por sua característica como elemento fundamental para a integridade do poço em todo o seu ciclo de vida, as indústrias fornecedoras de matéria-prima, laboratórios, centros de pesquisas e universidades, operadoras petrolíferas, prestadoras de serviços, fornecedores de unidades de cimentação e equipamentos, e todo o corpo técnico envolvido nas atividades de construção de poços, ano após ano, apresentam inúmeras contribuições em suas respectivas áreas para o contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento da cimentação. Dentre as mais recentes podemos citar: pastas de baixa densidade para poços ultra profundos; gerenciamento da pressão durante a cimentação, Monitoring Pressure Cementing (MPC) para poços com estreita margem entre pressão de poro e pressão de fratura; aditivos bloqueadores contra migração de gás, cimentos com plasticidade para resistir às tensões dinâmicas (ciclos de temperatura e pressão do poço a longo prazo) através da aplicação de resinas poliméricas, softwares simuladores para projeto e monitoramento da operação em tempo real, entre outras inúmeras inovações (WILSON, 2018), (TEOH et al., 2019).

Tabela 1: CSBs vs. Ciclo de vida do poço (adaptado de Khalifeh e Saasen, 2020).

| Operação                                      | Barreira Primária                                                  | Barreira Secundária                                             |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Perfuração<br>( <i>Drilling</i> )             | Lama de perfuração e o reboco ( <i>mudcake</i> )                   | Cimentação, Revestimento, Cabeça do Poço e BOP                  |
| Produção<br>( <i>Production</i> )             | Cimentação, Revestimento, <i>Packer</i> e Coluna de Produção, DHSV | Cimentação, Revestimento, Suspensor de Coluna e Árvore de Natal |
| Intervenção<br>( <i>Intervention</i> )        | Cimentação, Revestimento, Tampão de Fundo, Fluido de Completação   | Cimentação, Revestimento, Cabeça do Poço e BOP                  |
| Abandono<br>( <i>Plug &amp; Abandonment</i> ) | Cimentação, Revestimento e Tampão de Cimento                       | Cimentações, Revestimentos e Tampões de Cimento                 |

## 1.1 Motivações

A importância de se estudar a confiabilidade do elemento de barreira “cimentação primária” durante a fase de projeto pode ser vista na consolidação de problemas relacionados à integridade de poço (ALAWAD; MOHAMMAD, 2016), onde “problemas com a cimentação” é a maior ocorrência com 12446 incidentes, superando em quase 20 vezes a incidência de falhas na coluna de produção e em 5 vezes a incidência de falha no revestimento o que resulta numa representação gráfica desproporcional ante as demais falhas de baixa ocorrência, vide Figura 1.3.

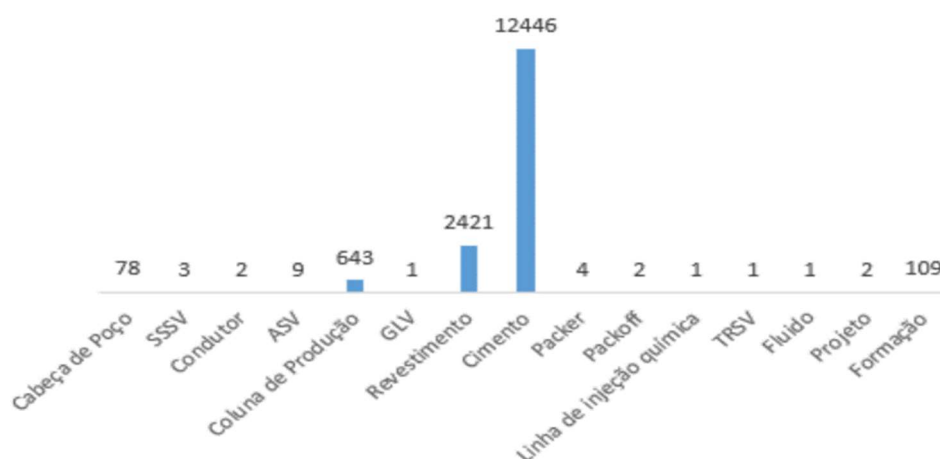


Figura 1.3: Perda de integridade por categoria de falha (adaptado de Al Alwad, 2016).

Durante a construção do poço, a importância deste elemento é destacada quando se considera o risco potencial de *blowout*. Conforme relatado pela American Petroleum Institute - API, (2010) a causa de 3,7% de todos os *blowouts* ocorridos nos EUA entre 1960 e 1996 foi a cimentação. Um resumo dos *blowouts* ocorridos em plataforma continental nos EUA entre 1992 e 2006, indica que a cimentação foi a causa de falha em 18 ocorrências entre 39 casos de *blowouts* (IZON; DANENBERGER; MAYES, 2007). Falhas relacionadas ao teste do elemento de barreira cimento foram apontadas como a causa raiz do acidente sem precedentes na história ocorrido no Golfo do México, Campo de Macondo, na plataforma *Deepwater Horizon* em 2010. (XUE et al., 2013)

Erros ao estimar a pressão de poros podem induzir a instabilidades no poço e perda de circulação, se essas perdas não forem controladas durante a operação de cimentação, o topo do cimento poderá não atingir a altura determinada, comprometendo o isolamento hidráulico e o suporte estrutural do revestimento. Esses problemas podem levar a despesas adicionais tais como operações de remediação, tempo não produtivo, utilização adicional de materiais e recursos humanos bem como custos logísticos.

Os poços do pré-sal brasileiro apresentam com frequência, devido às características da formação carbonática e a elevadas pressões de circulação observadas nas operações, grandes perdas de volume de fluido ao longo da cimentação do revestimento na zona permeável. Fenômeno semelhante não é observado ao longo da cimentação do revestimento na zona do sal, contudo, outros problemas associados à dissolução da formação salina em contato com os fluidos da operação e sua plasticidade sejam igualmente prejudiciais para a operação, a despeito das medidas adotadas de antemão para atenuar essas intercorrências, tais problemas não se

apresentam com o mesmo grau de criticidade se comparados à perda de circulação em cimentações realizadas na zona permeável.

Destarte, este trabalho se propõe a avaliar o impacto das perdas de circulação ocorridas durante a operação de cimentação primária do último revestimento, aqui denominado como revestimento de produção. A possibilidade de se comparar as diferentes configurações de completação e sua cimentação primária podem ser feitas nas seguintes condições encontradas: quando a cimentação ocorre apenas na zona impermeável (rocha capeadora); e quando a cimentação é feita conjuntamente, ou seja, a zona impermeável e a zona permeável são cimentadas numa única operação, conforme ilustrado na Figura 1.4.

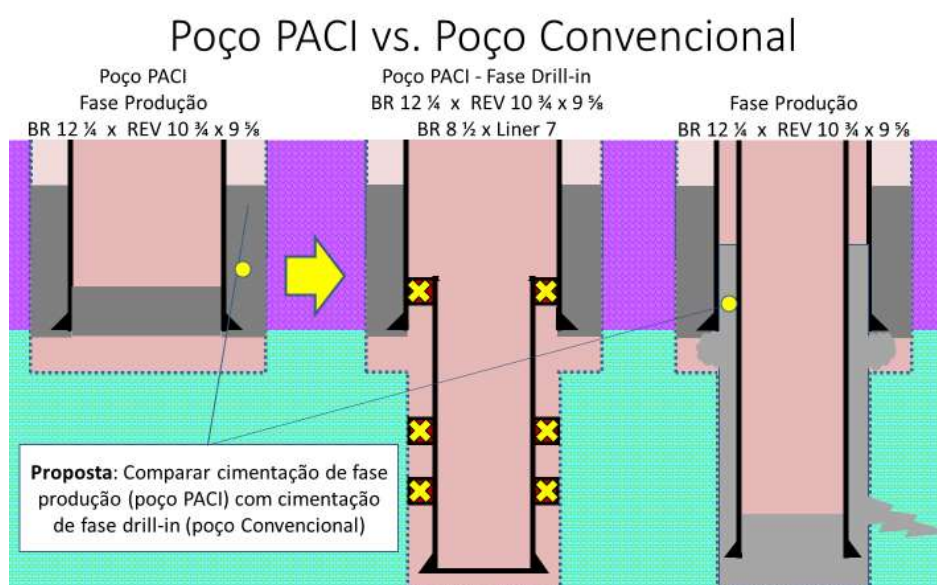


Figura 1.4: Poço Aberto de Completação Inteligente (PACI) vs. Poço Convencional  
(fonte: do autor)

Com a metodologia de análise proposta neste trabalho, espera-se verificar a influência da cimentação em conjunto da zona impermeável com a zona permeável e a diferença de potência hidráulica aplicada no deslocamento da pasta de cimento.

Este tema é inovador ao considerarmos a baixa disponibilidade de estudos sobre a potência hidráulica e a qualidade da cimentação, sendo a última amplamente abordada na literatura técnica sob diferentes aspectos; quanto a qualidade dos perfis sônicos, composição química da pasta de cimento e seus aditivos, testes laboratoriais..., e, quanto a potência hidráulica, esta é parcialmente aludida nos estudos sobre o regime de escoamento da pasta e sua influência na remoção do fluido de perfuração e melhor aderência entre os elementos revestimento-cimento-formação, daí a justificativa em se estudar e analisar a influência dos

parâmetros operacionais pressão e vazão *in loco* e seus desdobramentos quanto à qualidade e à confiabilidade da cimentação primária.

## 1.2 Objetivos

Este estudo se propõe a realizar uma análise e qualificar o isolamento hidráulico da cimentação primária na fase de produção, onde o revestimento situa-se em frente a rocha capeadora, através dos dados operacionais de campos dos quais sejam possíveis:

- Calcular a potência hidráulica aplicada no deslocamento da pasta de cimento em sua extensão total;
- Elaborar um indicador de qualidade da cimentação;
- Classificar os poços conforme indicador respectivo;
- Comparar o indicador de qualidade vs. perfil sônico;
- Estabelecer um indicador padrão para determinado campo (agrupamento de poços).

Ao final deste trabalho espera-se apresentar uma nova abordagem quanto a integridade do elemento de barreira cimento sob o conceito de assinatura operacional associado à potência hidráulica, com vistas a contribuir para a tomada de decisões em projetos de poços concernente ao número de fases perfuradas e procedimentos operacionais.

## 1.3 Estrutura

O Capítulo 1 contém a introdução do tema, a motivação e a descrição de sua estrutura.

No Capítulo 2 tem-se a revisão literária de assuntos correlatos ao tema deste trabalho uma vez que não foram encontrados trabalhos prévios relacionados à cimentação primária e a potência hidráulica empregada, contudo a revisão dos temas correlatos contribuiu sobremaneira para o entendimento do tema proposto.

O Capítulo 3 compreende o arcabouço teórico necessário para se entender uma operação de cimentação perpassando os aspectos operacionais e as equações que descrevem uma cimentação, sua potência hidráulica de fundo e os índices que a definem.

No Capítulo 4 tem-se exemplificado a aplicação das equações, a metodologia prática de como o indicador deve ser empregado e a interpretação dos resultados.

O Capítulo 5 discorre sobre a utilização dos dados coletados em campo para um grupo de mais de uma centena de poços, apresenta os resultados da metodologia desenvolvida e o indicador da qualidade da cimentação para o grupo de poços estudados.

Por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões obtidas deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros visando o aperfeiçoamento e consolidação do tema.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Reconhecido como o principal elemento de barreira na composição de um conjunto solidário de barreiras, a cimentação primária se apresenta como o mais versátil e confiável material para o preenchimento anular atuando como uma interface de segurança entre reservatório e revestimento, contudo diversas considerações deverão ser feitas a fim de se definir o que é uma cimentação bem-sucedida sob o âmbito operacional.

Esta revisão bibliográfica abrange prioritariamente as intercorrências de uma operação de bombeamento de pasta de cimento que envolvam volumes de perda e parâmetros operacionais, fatores estes que estão intrinsecamente relacionados a potência hidráulica dispendida e a eficiência da operação. Os tópicos abaixo compõem a linha de pesquisa bibliográfica visando abranger os aspectos de qualidade da cimentação no que tange à:

- Fatores de influência na cimentação primária;
- Regimes de escoamento na cimentação primária;
- Perdas de circulação e materiais de controle de perda;
- Monitoramento em tempo real da operação;
- Assinatura operacional e caracterização do fenômeno.

### 2.1 Fatores de influência na cimentação primária

Lima analisou estatisticamente as falhas de isolamento da cimentação e as possíveis influências de vários fatores nessas falhas. Ainda segundo Lima (2018), a companhia de serviço, a localização do poço (região administrativa), o tipo de fluido de perfuração (aquoso ou não-aquoso), os aditivos da pasta de cimento e a inclinação de poço não têm influência no isolamento.

Os fatores que influenciam de fato são a fase de perfuração, a extensão da cimentação e a ocorrência de perda de circulação. Foi observado que as cimentações realizadas na fase intermediária tiveram sucesso em 99% dos casos, enquanto que as cimentações na fase produção tiveram uma taxa de sucesso de 92%; cimentações de até 600 m de extensão tiveram uma taxa de sucesso de 98%, enquanto que cimentações de grande extensão (> 600 m) tiveram uma taxa de sucesso de 90%; por fim, cimentações em zona sem perda tiveram sucesso em 98% dos casos, enquanto que cimentações em zonas com perda tiveram sucesso de 95%.

Esses três fatores; a fase de perfuração; a extensão da cimentação e ocorrência de perda de circulação, têm em comum apresentarem maior incidência de ocorrência quando se cimenta o reservatório (zona permeável) juntamente com a fase de produção. Segundo Lima, uma prática comum na indústria é a cimentação da fase de produção incluir a cimentação do reservatório em conjunto, o que leva à necessidade de cimentar trechos longos, já que a cimentação deve ultrapassar a zona permeável (reservatório) para poder atingir a rocha capeadora. A perda de circulação, dentre outras causas (fraturamento da sapata, fraturas naturais, etc.), é uma característica intrínseca a zonas permeáveis.

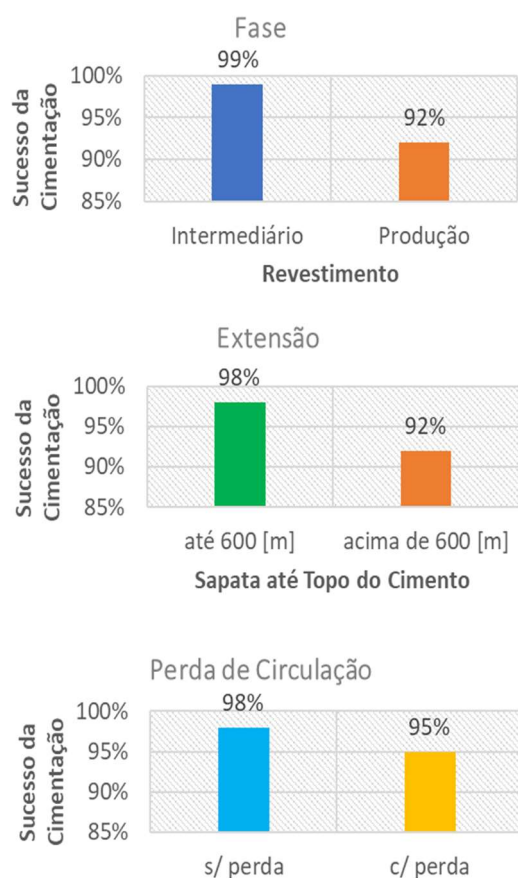


Figura 2.1: Fatores de influência no sucesso da operação de cimentação primária (adaptado de Lima, 2018).

## 2.2 Regimes de escoamento na cimentação primária

Um fator não considerado por Lima (2018) é a potência hidráulica aplicada no deslocamento da pasta em frente à rocha capeadora. A potência deve ser suficiente para gerar a turbulência necessária para remoção dos rebocos do fluido de perfuração e, deste modo, evitar a contaminação da pasta. (BURDYLO; BIRCH, 1990). A Figura 2.2 exemplifica os padrões de escoamento (plug, laminar e turbulento) da pasta de cimento dentro do anular do poço (KHALIFEH; SAASEN, 2020).

Segundo Brice e Holmes (1964), o fluxo turbulento e o tempo de contato da pasta de cimento durante o fluxo nas paredes do poço e do revestimento são fatores que influenciam na qualidade da cimentação implicando em maiores probabilidades de sucesso tanto maior forem esses valores. Contudo, no caso da cimentação em conjunto com o reservatório, além da perda de energia devido à grande extensão que deve ser percorrida a pasta até sua chegada à rocha capeadora, tem-se a preocupação em não aumentar a pressão de deslocamento para evitar a perda de circulação da pasta de cimento para a formação permeável devido ao fraturamento indesejável da formação, bem como danos a sapata do revestimento anterior.

Seções de ocorrência de alargamentos do diâmetro do poço (*washouts*) devido a não uniformidade estrutural da formação, prejudica o perfil de velocidades causando transições entre regimes turbulentos para regimes laminares (HAUT; CROOK, 1979). Quando alargamentos ocorrem, o perfil de velocidades no anular é menor e o fluido de perfuração depositado em estado gelificado torna-se mais difícil de ser removido pela pasta de cimento. Incertezas quanto ao volume do poço podem interferir no cálculo do volume de pasta de cimento ocasionando um topo de cimento incorreto, embora seja usual utilizar-se de um perfil de calibração do poço.

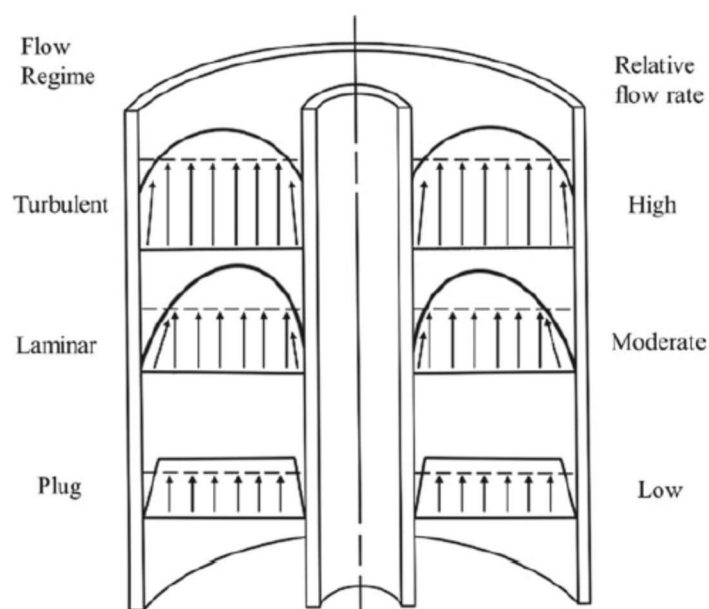


Figura 2.2: Perfis de escoamento da pasta de cimento (adaptado de Khalifeh e Saasen, 2020).

O fluido de perfuração e a pasta de cimentação são exemplos típicos de fluidos não newtonianos, ou seja, requerem um determinado diferencial de pressão para estabelecerem uma

vazão significativa. Essa vazão determina o perfil de velocidades os quais podem ser verificados na Figura 2.2. Existem duas possibilidades para o regime de escoamento de um fluido não newtoniano, o laminar e o turbulento, sendo que o fluxo tipo tampão (plug) é definido com um padrão de fluxo tipo laminar. Como pode-se observar, a massa de velocidades (linhas tracejadas) e o perfil de velocidades (linha cheia) não são iguais, e a velocidade axial (vetores) no regime laminar não é tão uniforme quantos as velocidades axiais no regime turbulento. A distribuição da velocidade axial atinge seu máximo no centro em cada regime de fluxo e são maiores do que a velocidade axial na camada adjacente às paredes, por conseguinte a remoção de lama torna-se complexa e ineficiente, tornando assim a pasta de cimento mais susceptível a contaminação.

Conforme demonstrado por Haut e Crook (1979), a contaminação é devido às instabilidades que ocorrem na interface cimento-lama, onde os perfis de velocidade não são estritamente axiais. A formação de instabilidades é resultante do acoplamento não linear de mudanças na taxa de cisalhamento e tensão na interface dos fluidos incorrendo na canalização do cimento.

Para se atingir um regime turbulento da pasta de cimento, altas vazões são necessárias, porém inatingíveis se a pasta apresentar alta viscosidade. Quando uma tensão é aplicada em um fluido não newtoniano, para superar a resistência ao fluxo uma tensão tem que ser aplicada acima da deformação elástica até irromper seu limite de escoamento (BARNES, HUTTON, WALTER, 1989) Na prática, o fluxo turbulento é menos provável de ser atingido devido à fatores operacionais, contudo, sob o ponto de vista operacional, é importante que perdas por atrito oriundas da pasta de cimento sejam maiores que as perdas por atrito da lama de perfuração no poço.

### **2.3 Perdas de circulação e materiais de controle de perda**

Fraturas naturais ou induzidas pelo fluido de perfuração, sendo este o mais recorrente, são responsáveis por frequentes perdas de circulação conforme preceituado por Howard e Scott (1951), em seu trabalho sobre análise e controle de perdas. Como contra medida às perdas, dotar o fluido de perfuração com materiais apropriados reduz o volume de perdas, sejam estas estáticas ou dinâmicas, contribuindo para o preenchimento de pequenas fraturas e interrompendo a sua propagação ao longo da operação de perfuração. Materiais granulares, variação granulométrica, características de bombeamento e concentração na lama de perfuração apresentaram-se efetivos no bloqueio das perdas correlacionadas a um limite máximo de fratura (ALSABA; NYGAARD, 2014).

Os colchões de lavagem que precedem a pasta de cimentação, por sua vez provocam a remoção da lama de perfuração provocando em certo grau a erosão do *mudcake* incorrendo na reabertura de fendas originais ou induzidas pela pressão total de fundo. Daccord e Baret (1992), analisaram os requisitos para a pasta de cimento, cuja perda de filtrado ocorre em condições estáticas e dinâmicas, salientando quanto as consequências prejudiciais da perda de fluido na cimentação primária designando-as: redução do volume de pasta de cimento acompanhado de um aumento de sua densidade e viscosidade; formação de uma camada de cimento e consequente redução do escoamento devido à perda de pressão por atrito; infiltração da zona radial do poço pelo volume de perda de filtrado. Tais consequências podem ser previamente quantificadas dado as características da pasta de cimento, as propriedades do *mudcake* entre outros parâmetros, a fim de definir qual o componente mais sensível; as paredes do poço ou a pasta de cimento, e sob qual condição de infiltração implicaria maiores perdas; estática ou dinâmica.

A província petrolífera que se compõem dos reservatórios do pré-sal brasileiro apresenta características severas de perdas por infiltração. Além de formações permeáveis e zonas depletadas, as rochas reservatório apresentam estruturas cavernosas prejudicando as atividades de perfuração, cimentação e *work-over*. Miranda et al. (2017), em ensaios laboratoriais, simulou através de um aparato específico as condições de permeabilidade comumente encontradas no pré-sal brasileiro e submeteu diferentes tipos de materiais disponíveis comercialmente (granulares, fibrosos e floculares) à níveis variados de severidade de perda avaliando-os conforme sua eficiência caso a caso. O desenvolvimento do aparato de teste para perdas severas permitiu em ambiente controlado avaliar os materiais e definir qual o mais apropriado para uso como LCM (*Lost Control Material*) em situações reais encontradas nas operações de campo.

Adicionados a pasta de cimento, LCMs apresentaram-se eficientes para determinadas composições químicas de cimento onde, através da adição de materiais de baixo custo (esponja de poliestireno) e agentes formadores de espuma, obtiveram composições estáveis com alta taxa água/cimento, resistência mecânica e efetivas no controle de perdas por infiltração conforme demonstrado por FILHO (2018), em sua tese sobre o estudo de pastas de cimentação para aplicação em poços com zonas fraturadas.

Alkinani et al. (2019), demonstrou através de uma abordagem estatística a tendência quanto ao uso de determinados LCMs adotados em diferentes localidades distribuídas globalmente. Ao relacionar os tratamentos de contenção, material e a tipificação do volume de perda (infiltração, perda parcial, severa e completa) concluiu que, em linhas gerais, lamas de alta viscosidade e plugs de cimento são amplamente utilizados em condições de perdas severas

e completas, salientando que para perdas parciais existem tratamentos mais eficientes e menos custosos à disposição das operadoras.

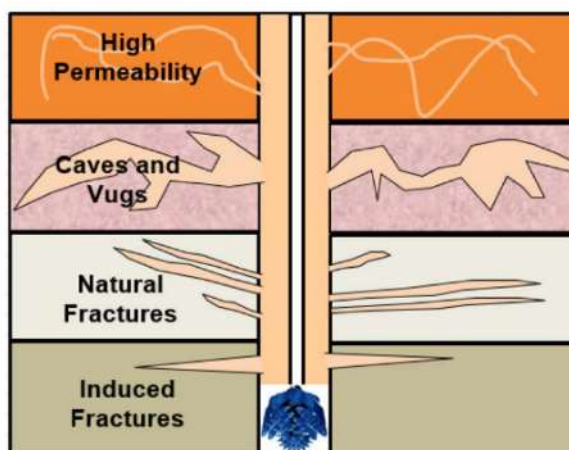


Figura 2.3: Formação e perda de circulação (fonte: Alkinani et al., 2019).

Engenheiros de Campo especialistas em cimentação apresentaram em seu trabalho de pesquisa que 12% do tempo não produtivo acumulado em dado ano foi decorrente da perda de circulação, e que em 2014 a maior operadora local despendeu até 100 dias do ano para ações de remediação de perdas chegando a acumular 170 mil barris de lama de perfuração perdidas para a formação. A equipe obteve resultados positivos em operações de cimentação primária em frente ao reservatório de rocha carbonática do pré-sal brasileiro ao utilizarem-se de materiais fibrosos no colchão espaçador a frente da pasta de cimento, uma aplicação inovadora destacando-se em particular pela eficiência na remoção da lama a base de água (reconhecida por depositar camadas mais espessas de *mudcake* nas paredes do poço) e deposição de material de contenção de perdas na zona permeável. Os benefícios foram atestados através da resposta dos perfis sônicos (FREITAS et al., 2019).

## 2.4 Monitoramento em tempo real da operação

As operações de maior criticidade que ocorrem em uma plataforma de perfuração são acompanhadas pelo time de especialistas em terra em tempo real. Monitores, *dashboards*, (painéis que apresentam as métricas e indicadores fundamentais para atingimento de objetivos e metas operacionais, cuja apresentação visual facilita a compreensão das informações geradas), canais de comunicação direta com a equipe de operações na plataforma, etc., já são demasiado empregadas pelas grandes operadoras do setor petrolífero.

Equipes compostas por especialistas de diferentes prestadoras de serviços e operadoras utilizam-se das melhores práticas e lições aprendidas em cimentação primária para incrementar

a qualidade dessas operações e seus resultados. Normas basilares do setor como a API 65 parte 2 e Norsok Standard D010 preconizam as boas práticas para o sucesso da cimentação e sua função como elemento de barreira. Ao concentrar esforços em um projeto, execução e avaliação sem falhas, focando na caracterização e classificação do elemento de barreira, o processo para a instalação desse elemento sob o gerenciamento da empresa executora, a interação com o representante da operadora e contando com a contribuição do time de especialistas, o perigo potencial e o risco são identificados e mitigados evitando-se ao final retrabalhos desnecessários (DEBRUIJN et al., 2012).

Em operações de cimentação primária, a execução apropriada deve vir acompanhada de monitoramento, controle e análise de vários fatores (BURDYLO; BIRCH, 1990), (SMITH, 1986). A aquisição simultânea de dados como pressão de bombeamento, vazões de entrada e saída, densidades de entrada e saída, bem como a pressão no cabeça do poço, volumes acumulados de retorno e peso da coluna durante movimento recíproco já são monitorados e prontamente a disposição das operadoras através das prestadoras de serviço cada qual com seu software proprietário. Outro fator relevante à aquisição de dados é a pós-análise que permite, através de situações anormais observadas na operação, implementar novas abordagens no projeto para o sucesso da execução. Canalização do cimento, restrição anular, incompatibilidade de fluidos, problemas de equipamento ou revestimento, práticas pobres de execução da operação, são passíveis de identificação na pós-análise permitindo a prevenção e correção nos projetos e execuções futuras, para tanto é necessário qualidade na aquisição desses dados.

Um dos fatores para a boa execução de uma operação de cimentação é o condicionamento prévio que deve ser feito através da circulação de fluido coluna/anular. O monitoramento da pressão de cabeça do poço permitiu através de um programa computacional estimar o tempo ótimo de circulação, vazão e melhor fluido para o condicionamento do poço conforme estudo (RAVI; BEIRUTE; COVINGTON, 1994) ao simularem em um poço de teste as condições reais de operação.

Indicadores de posicionamento da pasta de cimento (PIS) permitem, através da leitura de um pico de pressão exercida em função da restrição da passagem do plug em um perfil calibrado instalado no interior do revestimento, a verificação em tempo real da eficiência de deslocamento volumétrico da unidade de cimentação. Em caso de desvio com relação ao projetado, a equipe poderá efetuar em tempo hábil reajustes no volume do colchão de deslocamento, evitando-se assim exceder a altura projetada para o topo do cimento ou a extensão do *shoe track* (GRADISHAR; GROESBECK, 2010).

Após o trágico acidente ocorrido na *Deepwater Horizon* no Golfo do México em 2010, as Agências Reguladoras reforçaram as diretrizes de segurança operacional e grande ênfase foi dada ao monitoramento e avaliação da operação de cimentação primária em tempo real (RTME). As empresas prestadoras de serviços na construção de poços não tardaram em apresentar suas inovações indo muito além da simples aquisição de dados como pressão, densidade e vazão. O pacote computacional atualmente empregado possibilita o acompanhamento remoto da equipe de especialistas em terra, apresentando um diagnóstico operacional e possibilitando a previsão de situações anormais e instáveis do poço ao longo da operação. Ao prever e monitorar a pressão equivalente de circulação (ECP) em qualquer profundidade de deslocamento da pasta, o software possibilita que a equipe faça ajustes imediatos na operação, por exemplo variando a vazão de bombeio e movimentando o revestimento para otimizar a distribuição do cimento na zona de interesse (TORRES et al., 2017). A correspondência das pressões de cabeça de poço e vazões de retorno, ao serem comparadas com as curvas de projeto/simulação com as curvas em tempo real, conferem a boa precisão das equações matemáticas adotadas no programa (CONTRERAS et al., 2017).

O gerenciamento da pressão de cimentação (MPC), técnica equivalente ao gerenciamento da pressão de perfuração (MPD), é adotada em situações em que a pressão de poro e a pressão de fratura apresentam-se muito estreitas e, ao deslocar a pasta de cimento, a ECP ultrapassa a pressão de fratura da formação. O MPC permite uma pressão de fundo (BHP) no anular estável ao exercer uma condição *underbalance* a pressão estática de coluna assistindo para o deslocamento e ótimo posicionamento da pasta de cimento (TEOH et al., 2019).

## **2.5 Assinatura operacional e caracterização do fenômeno**

A queda-livre da pasta de cimento dentro da coluna durante a operação ocasionada pelas forças gravitacionais e diferentes densidades de fluido, é o conceito pioneiro em assinatura operacional definido por Beirute (1984), facilmente identificada pela ocorrência de vácuo momentâneo registrado na cabeça de poço e desbalanceamento das taxas de bombeamento e retorno, sendo observado uma vazão de retorno maior do que a vazão de bombeamento. Embora seja um fenômeno previsível e indesejável, a aceleração da pasta não resultou em perdas de fluido comprovado, porém a interrupção abrupta causa um pico de pressão elevada no fundo do poço podendo incorrer danos à formação e revestimento.

Outros problemas comuns associados à operação de cimentação primária conforme Beirute (1988):

- Canalização do cimento: condição na qual o fluxo de cimento é canalizado em apenas um ou mais lados do revestimento ou do poço não proporcionando um isolamento hidráulico radial adequado;
- Erosão por escoamento: seções de ocorrência de alargamento do diâmetro do poço acima do diâmetro original da broca;
- Perda de circulação: redução parcial ou total ausência de fluxo no anular quando fluidos são bombeados pela coluna;
- Influxos; ocorrência na qual fluidos originários da formação prejudicam o isolamento hidráulico (gás, água de formação, óleo)
- Restrição de fluxo: obstrução causada por deposição de detritos no anular do poço;
- Desidratação da pasta de cimento: perda de água da pasta de cimento para formação devido ao processo de filtração formando uma camada na parede do poço.

Os problemas descritos foram simulados computacionalmente e assinaturas operacionais foram tipificadas e comparadas as curvas previstas (simuladas). Três exemplos muito recorrentes nas operações de cimentação primária estão exemplificados nas figuras abaixo: para a canalização durante a cimentação, Figura 2; perda de circulação, Figura 3, e restrições de fundo de poço, Figura 4 (Beirute, 1988).

A canalização foi simulada através da comparação entre duas simulações com diferentes diâmetros de poço, contudo o volume de cimento foi o mesmo para ambos os casos. Embora a perda de circulação não tenha sido possível obter através do simulador, pela descrição de especialista com experiência em campo, o comportamento pode ser inferido e assim comparado a uma situação normal. Outra condição pode ser simulada através de uma restrição localizada no fundo do poço para o mesmo poço e sistema de bombeamento usado anteriormente. Análise posterior a operação de cimentação permite identificar o local exato da restrição.

Beirute conclui em seu trabalho que os simuladores computacionais são um meio efetivo para monitorar as operações de cimentação e de grande valia na identificação de problemas, contudo pequenas discrepâncias entre o que foi obtido e o calculado deve ser ignorado devido às limitações na aquisição dos dados, não devendo ser precipitada a interpretação dos resultados e classificando-os como um problema.

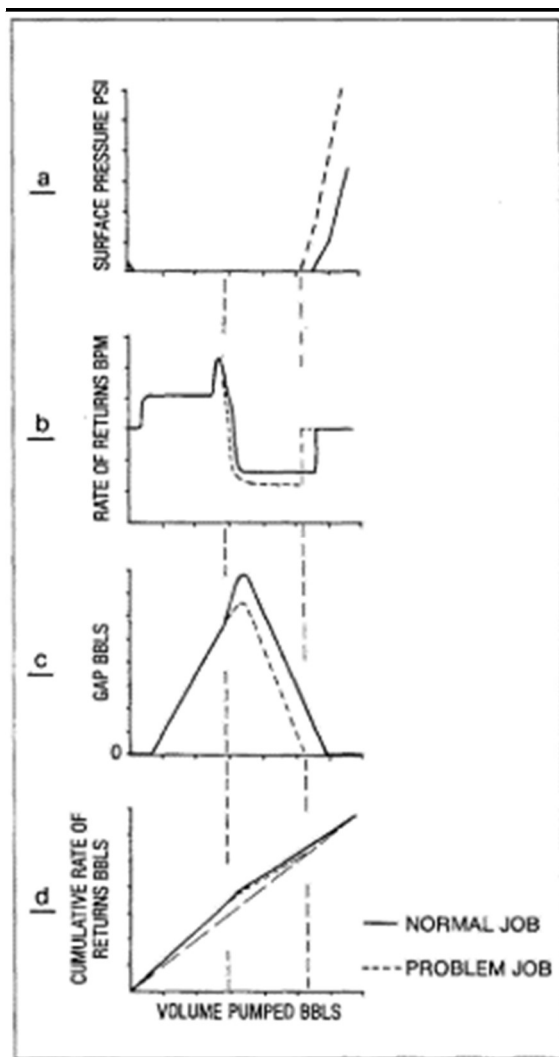
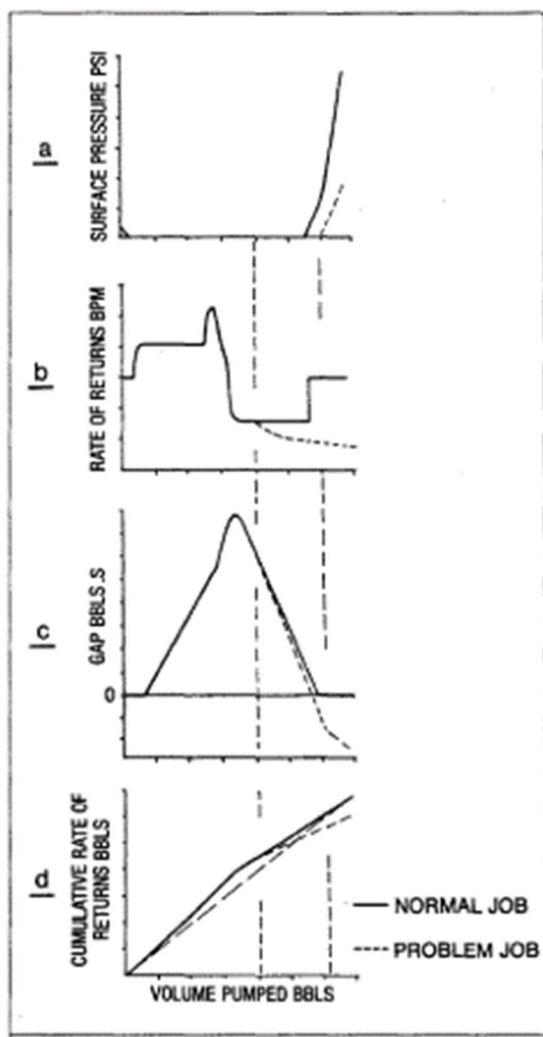


Figura 2.4: Canalização e assinatura operacional (adaptado de Beirute, 1988).

- a) Canalização inicia-se com a chegada do cimento no anular, o período de queda-livre começa antes do esperado e termina antes do esperado. Ao final da operação, a pressão de superfície é maior e mais íngreme do que o esperado.
- b) A taxa de retorno comporta-se quase como o esperado na fase de aceleração da queda-livre, porém a fase de desaceleração fica abaixo do previsto na curva de controle.
- c) A curva que representa a diferença de volume & volume acumulado assenta-se abaixo da curva prevista, iniciando-se assim que o problema se apresenta.
- d) A taxa de retorno acumulativa assenta-se abaixo da curva prevista assim que o problema se apresenta.

As anomalias operacionais como influxos, perda de circulação, restrições de superfície, são muito distintas em termos de assinatura, o que contribui para o diagnóstico da operação e possíveis soluções, enquanto que a desidratação da pasta de cimento, restrições no fundo do poço e canalização apresentam maiores dificuldades de se distinguirem bem como múltiplas ocorrências dessas assinaturas.

Ênfase deve ser dada aos equipamentos de aquisição, aos parâmetros operacionais previamente definidos e a estrita observância e execução conforme planejado, envidando esforços para uma operação bem sucedida.

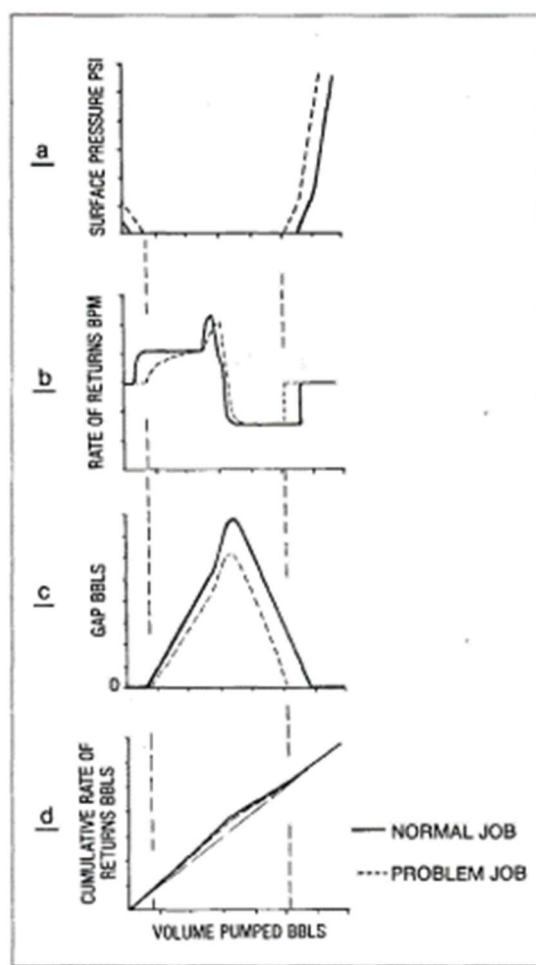


- O sistema permanece em queda-livre além do esperado, a pressão de superfície e a curva de pressão é menor do que o esperado.
- A taxa de retorno é inferior ao esperado inicialmente no momento que o problema se apresenta e, dependendo da severidade da perda, possivelmente não retornará aos níveis iniciais mesmo após o término da queda-livre. Embora a taxa de retorno seja menor na superfície, a queda-livre na coluna é intensa pois houve redução da hidrostática no anular devido às perdas. Isso pode ser facilmente evidenciado pela pressão negativa na cabeça de cimentação.
- A curva de “gap” assenta-se abaixo da curva prevista no momento da ocorrência do problema e om tendência negativa, condição essa necessária para caracterizar a perda de circulação.
- A vazão acumulativa de retorno assenta-se abaixo da curva prevista iniciando-se no momento da ocorrência do problema.

Figura 2.5: Perda de circulação e assinatura operacional (adaptado de Beirute, 1988).

Beirute preconizou o fenômeno de queda-livre nas operações de cimentação e diversos autores estudaram os impactos deste fenômeno na taxa de vazão de retorno e deslocamento da pasta de cimento concluindo que os parâmetros principais a serem monitorados são as vazões de entrada e saída ao longo da operação, (DOOPLY et al., 2019; PIOT; LOIZZO, 1998). Porém, segundo Dooply em seu trabalho sobre assinaturas operacionais e perdas dinâmicas em operações de cimentação (2019), o monitoramento da vazão de retorno, a despeito de sua primazia, ainda é o parâmetro mais negligenciados devido a maioria das plataformas de

perfuração não contarem com esses medidores na linha de retorno do anular, valendo-se apenas da verificação dos volumes dos tanques de lama versus volume bombeado.



- a) O fluido entra em queda-livre em atraso e retorna antecipadamente. A pressão de superfície deve ser maior do que esperado e, a depender da restrição, a pressão poderá se manter positiva mesmo durante a queda livre dos fluidos. A curva de pressão é semelhante ao previsto, isso se deve à pressão de atrito gerada pela obstrução e não pela pressão hidrostática.
- b) A curva de taxa de retorno assenta-se abaixo da esperada durante a fase de aceleração invertendo-se acima durante a desaceleração. Ao final, a taxa de retorno tende a nivelar-se com os valores previstos antecipadamente.
- c) A curva de “gap” assenta-se abaixo do previsto assim que o problema se apresenta.
- d) A curva de taxa de retorno acumulativa assenta-se abaixo assim que problema se apresenta.

Figura 2.6: Restrições de fundo do poço (adaptado de Beirute, 1988).

Ao utilizar sensores de vazão tipo rotor e sensores de monitoramento de volume dos tanques de lama, ambos devidamente calibrados, Dooply demonstrou o impacto que as perdas de fluido causam ao longo da operação através da simulação de dois cenários: com perdas dinâmicas e sem perdas dinâmicas, Figura 2.7. Ao simular, para os dois cenários, a curva de pressão para a operação versus a assinatura obtida durante o monitoramento, a curva de pressão com perdas dinâmicas teve um melhor ajuste com a curva de pressão em tempo real.

Em números, ao final da operação observou-se 400 psi de diferença ante aos 640 psi para a curva sem perdas dinâmicas. Tal diferença pode ser justificada após uma análise de sensibilidade dada em função das perdas por atrito no sistema de superfície, restrições e demais considerações reológicas da lama.

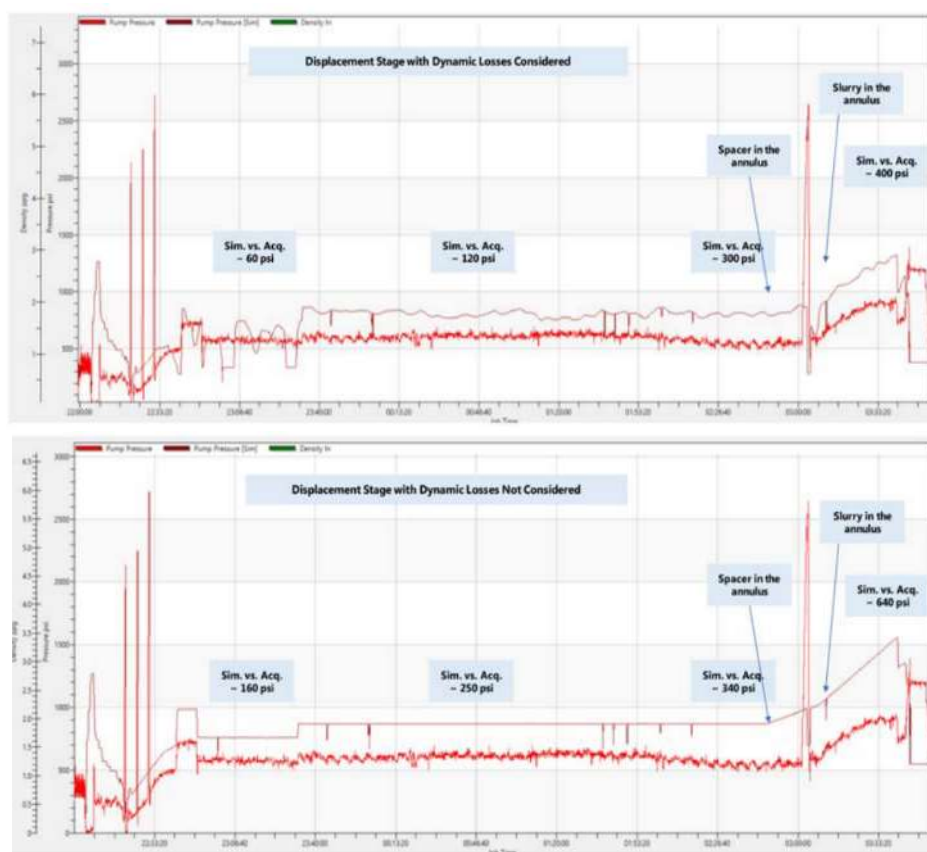


Figura 2.7: Deslocamento da programação de bombeamento com perdas dinâmicas e sem perdas dinâmicas (fonte: Dooply at al., 2019).

Painéis de monitoramento com diferentes níveis de aplicativos, ou seja, nichos de informações específicas da operação, por exemplo: pressão de superfície, vazão acumulativa, entre outros, permitem uma análise rápida da operação em contraste àquelas recebidas pelas prestadoras de serviço disponibilizadas horas após o término da operação de cimentação. Como benefício, os painéis de controle em tempo real aceleram o fluxo de informação local e reduzem o tempo de avaliação do resultado da operação contribuindo sobremaneira nas tomadas de decisão (GOMES; JAMES; THEROND, 2017).

Um exemplo ilustrativo do painel de controle, conforme Figura 2.8, apresenta no primeiro perfil, lado esquerdo, a pressão de bomba da unidade de cimentação (vermelho), vazão das bombas da sonda de perfuração (azul). O segundo perfil apresenta a vazão da bomba da unidade de cimentação (vermelho), a vazão das bombas da sonda de perfuração (azul) e a vazão de perda obtida do tanque de lama (laranja), *mud pit*.

O terceiro perfil apresenta a densidade medida através da unidade de cimentação (verde). O quarto perfil apresenta o volume referente ao estágio do fluido bombeado de acordo com a

programação de bombeio (vermelho), o volume acumulado (verde), o número do estágio correspondente (azul) e o volume de perdas (laranja).

Embora seja de grande relevância os painéis apresentarem em tempo real a pressão, densidade, volumes e estágio da programação de bombeio, contudo, até o momento presente, a potência hidráulica ainda não foi explorada como um parâmetro operacional pelas operadoras e prestadoras de serviço nas operações de cimentação primária.

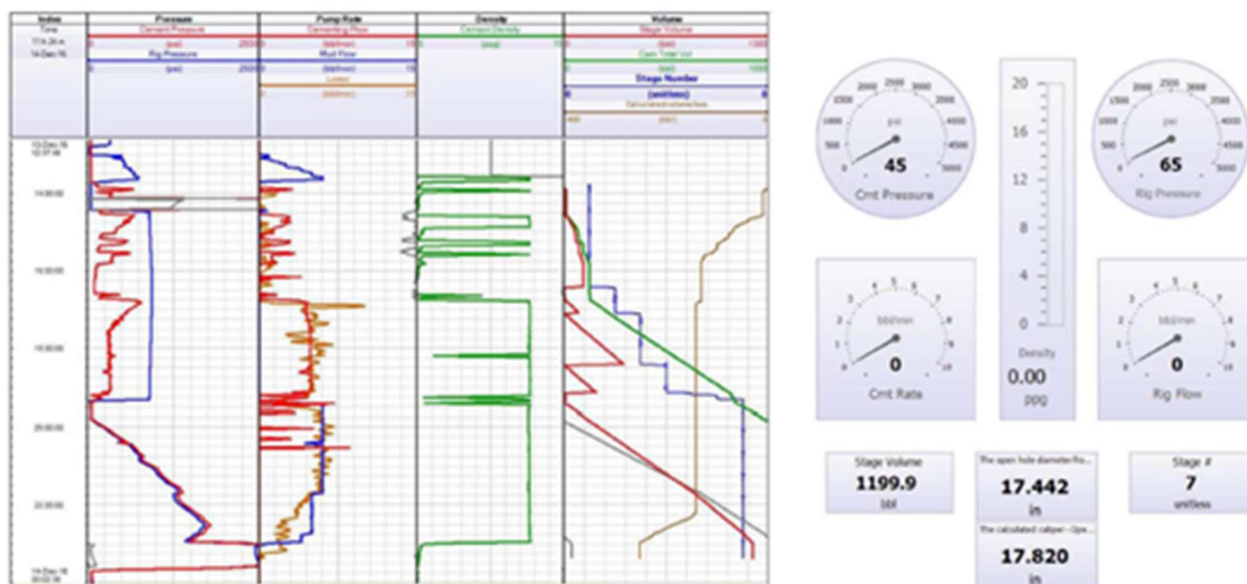


Figura 2.8: Log Display (fonte Gomes et al., 2017).

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A qualidade de uma cimentação para os poços do pré-sal precisa atender a critérios específicos quanto a sua exposição ao CO<sub>2</sub>, a presença de H<sub>2</sub>S, altas pressões e temperaturas, e margens estreitas para a densidade equivalente de circulação (ECD), migração de gás, entre outros (GREGATTI et al., 2015), (KIRAN et al., 2017), (MIURA; GARCIA, 1988).

As propriedades reológicas da pasta de cimento e seus aditivos não serão abordados neste estudo, tendo este como foco principal as questões operacionais abaixo:

- Configuração dos poços produtores;
- Programação de bombeamento;
- Equipamentos de superfície, cabeça de cimentação e colar flutuante;
- Etapas da operação de cimentação;
- Testes e avaliação do isolamento hidráulico;
- Hidráulica de cimentação.

#### 3.1 Configuração dos poços produtores

A primeira fase é perfurada no diâmetro de 36” e água do mar utilizada como fluido de perfuração. O condutor de 30” é instalado a uma profundidade de aproximadamente 80 [m] abaixo do leito marinho em formações de folhelho não consolidadas. A cimentação é executada com pastas de baixa complexidade. O objetivo maior é a verificação através de imagens do retorno de cimento ao leito marinho e coleta de amostras do cimento através de ROVs. Após a cura, o cimento deverá suportar a carga do demais revestimentos, *blow out preventer* (BOP), e árvore de natal (LIMA, 1992).

A segunda fase é perfurada com broca de 26” atravessando a camada de folhelhos até adentrar na formação salina. O revestimento de 20” é cimentado e a extensão deve cobrir toda a zona salina assegurando que a sapata apresente bons valores de *leakoff test* para a condição segura de perfuração das próximas fases.

A terceira fase atravessa a formação salina adentrando por alguns metros no reservatório de modo a confirmar que a formação salina, cuja extensão pode chegar a 2000 [m], foi finalizada.

O revestimento intermediário é descido e sua seção tem três diâmetros combinados; 14”, 13-3/8” e 13-5/8”, projetado para resistir a movimentação da formação salina uma vez que a sua seção superior está exposta ao sal. A bainha de cimento não se estende até a sapata

superior e seu objetivo é garantir uma sapata de alta resistência para a perfuração seguinte que atingirá a zona produtora.

A quarta fase é perfurada com broca de 12-1/4" atravessando o reservatório composto de rochas carbonáticas com alta ocorrência de perda de circulação. O revestimento é composto de duas seções; 10-3/4" e 9-5/8". A cimentação é crítica devido a presença de água, óleo e gás e por se tratar de uma cimentação em zona permeável.

A configuração tradicional foi otimizada dando origem ao poço revestido e cimentado de três fases, sendo que aquela que deveria ser 3ª e 4ª fase passaram a ser perfurados e cimentados numa única operação, e a configuração onde a zona produtora é mantida a poço aberto. O que determina a escolha do projeto adotado é a necessidade ou não de zonas produtoras selecionadas.

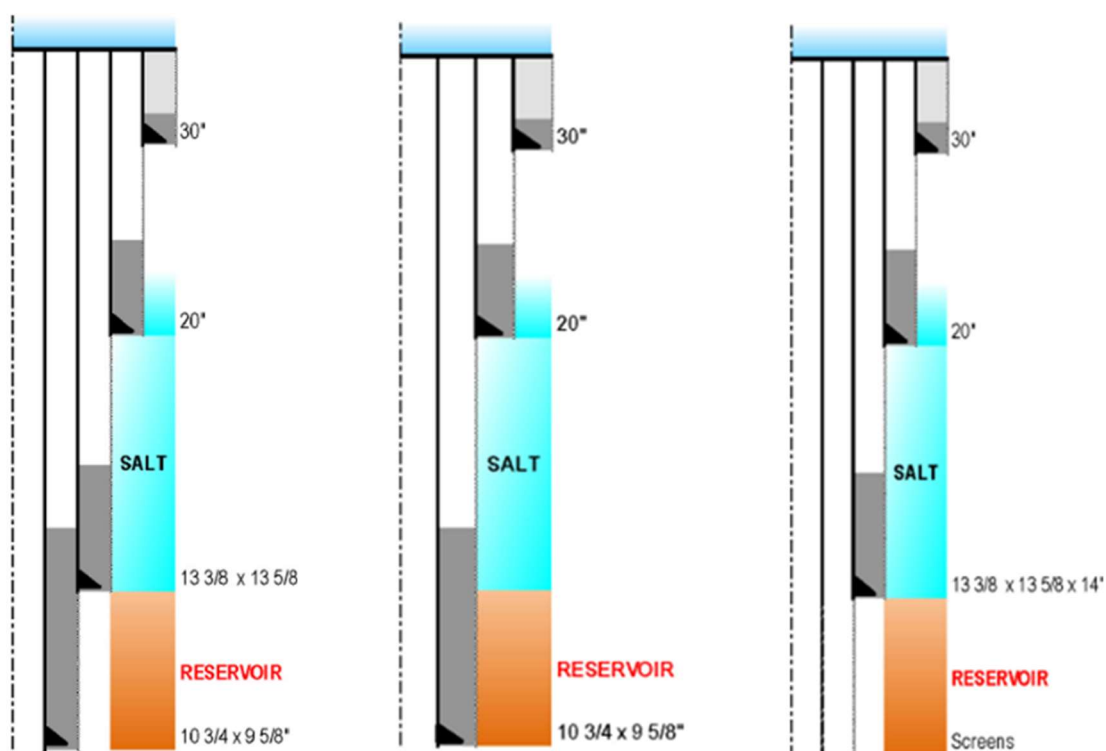


Figura 3.1: Principais configurações de poços do pré-sal, fases e revestimentos (adaptado de Gregatti et al., 2015).

### 3.2 Programação de bombeamento

Colchões de lavagem e espaçadores são bombeados à frente da pasta visando evitar contaminação desta pelo fluido de perfuração e vice-versa e auxiliar na remoção do *mudcake* das paredes do poço possibilitando melhor aderência de cimento.

Colchões de lavagem: os colchões de lavagem ou lavadores são volumes de fluido, 10 a 40 [bbl], pouco viscosos, compatíveis com a pasta e o fluido de perfuração, atuando por meio

de lavagem química e ação mecânica na diluição e remoção do *mudcake*. Contém materiais dispersantes (ou afinadores do fluido de perfuração), detergente e, quando necessário, aditivo para inibir inchamento de argila e redutores de filtrado. Quando usados com lama à base de óleo contém ainda surfactantes para inverter a “molhabilidade” do revestimento e formação.

Espaçadores: são geralmente viscosos e de densidade ajustável, com ação mecânica de remoção do *mudcake*, sendo de preparação mais trabalhosa e uso típico em situações onde se deseja evitar canalização de gás pela aplicação de pressão hidrostática.

### 3.3 Equipamentos de cimentação e acessórios

Os componentes e acessórios mais comuns utilizados nas operações de cimentação estão ilustrados na Figura 3.3, e estão conectados ou afixados à coluna de revestimento, visando garantir o melhor resultado da cimentação (THOMAS, 2001), (PAULA et al, 1989).

#### a) Silos de cimento:

Para as operações de perfuração em terra em geral o cimento é estocado na base da companhia de cimentação, em grandes silos, sendo enviado para a sonda por meio de carretas apropriadas. Nas plataformas marítimas são disponíveis silos para armazenamento de cimento e outros materiais a granel. Estes silos operam a baixa pressão, cerca de 30 [psi], quando da descarga do cimento;

#### b) Unidades de cimentação:

Montadas em caminhões para operações em terra ou sobre *skids* em sondas marítimas (Figura 3.2), as unidades de cimentação constam geralmente de dois motores para fornecer energia, até 2000 [hp], dois tanques de 10 [bbl] cada, para a água e aditivos, duas bombas triplex, dois conversores para converter movimento rotativo dos motores no movimento alternativo das bombas, bombas centrífugas auxiliares e um sistema de mistura (água e aditivos) é bombeada sob pressão por pequenos orifícios, fluindo em jatos sob um funil por onde chega o cimento.

A proporção da água injetada determinará a densidade da pasta que é controlada pelo operador. A pasta resultante é acumulada em um tanque ou “cuba” para homogeneização, de onde é sugada por meio de bombas triplex, que injetam para o poço. Toda a operação é monitorada via manômetros de pressão e medidores de fluxo, sendo feito o registro de uma carta circular onde estes valores são traçados, permitindo a análise posterior;



Figura 3.2: Unidade de cimentação tipo “skid”

(fonte: <https://www.slb.com/drilling/drilling-fluids-and-well-cementing/well-cementing/skid-mounted-cementing-units/cps-977-cement-pumping-skid>).

c) Linhas de cimentação:

A ligação entre a unidade de cimentação e o poço é feita por tubulação de alta pressão, formada por uma série de tubos curtos interligados por meio de conexões móveis (*chicksam*) dotadas de rolamento para possibilitar montagem até qualquer posição em que fique no topo do revestimento. Atualmente há a tendência de utilização de mangueiras especiais de borracha, mais práticas;

d) Cabeça de cimentação (*plug container*):

Conectada ao topo da coluna de revestimento, recebe a linha de cimentação, podendo abrigar em seu interior os tampões de borracha que separam a pasta do fluido de perfuração. Um mecanismo de travamento retém estes tampões até o instante próprio de sua liberação. Pode ter entrada para até 3 linhas, rolamento para permitir o giro da coluna de revestimento e sistema de conexão especial para maior rapidez de instalação;

e) Sapata (*float shoe*):

Colocada na extremidade da coluna, serve de guia para a introdução do revestimento no poço, podendo dispor de um mecanismo de vedação para evitar que a pasta, por ser mais pesada que o fluido de perfuração, retome ao interior do revestimento após seu deslocamento. Podem ser de dois tipos; sapata-guia, sapata flutuante;

f) Colar (*float collar*):

Posicionado 2 a 3 tubos acima da sapata, o colar serve para reter os tampões de cimentação, além de poder receber mecanismos de vedação (flutuante ou diferencial).

Normalmente é usado colar flutuante. Caso não tenha mecanismo de vedação, é denominado colar retentor;

g) Tampões de fundo (*bottom plug*):

É um tampão de borracha com uma membrana de baixa resistência em sua parte central. Lançado na coluna à frente da pasta de cimento, é por esta empurrado até que toque no colar retentor (ou flutuante), quando a membrana se rompe permitindo a passagem da pasta. Visa raspar o filme de sólidos do fluido de perfuração que se adere à parede do revestimento, evitando a contaminação da pasta;

h) Tampões de topo (*top plug*):

É um tampão rígido de borracha, lançado após a pasta, separando-a do fluido de perfuração que a deslocará, para evitar a sua contaminação. É retido pelo colar, causando um aumento de pressão que indica o término do deslocamento, permitindo a realização do teste de estanqueidade da coluna;

i) Colar de estágio:

Posicionado em algum ponto intermediário da coluna, permite que a cimentação seja feita em mais de uma etapa ou estágio, quando o trecho a ser cimentado é muito extenso ou quando existam zonas críticas muito acima da sapata. Possui orifícios em seu corpo, originalmente tamponados por um mandril de aço para a realização do 1º estágio, referente à cimentação do trecho próximo a sapata;

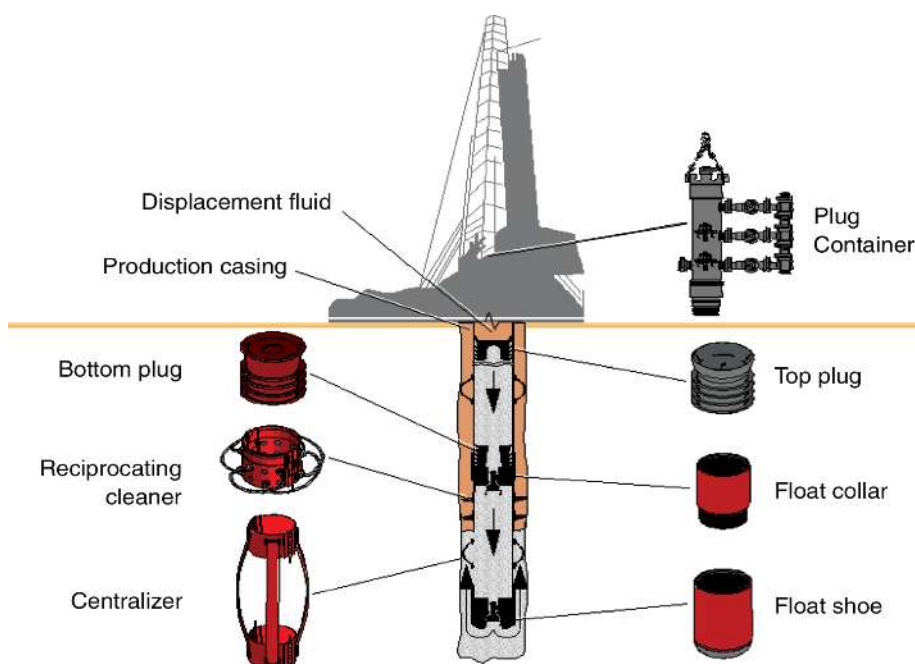


Figura 3.3 Componentes e acessórios de cimentação

(fonte: [https://petrowiki.spe.org/File:Devol2\\_1102final\\_Page\\_413\\_Image\\_0001.png#metadata](https://petrowiki.spe.org/File:Devol2_1102final_Page_413_Image_0001.png#metadata)).

j) Centralizadores (*centralizers*):

São peças compostas de um jogo de lâminas curvas de aço, que são afixados externamente à coluna de revestimento, visando centralizá-lo e causar um afastamento mínimo da parede do poço, para garantir a distribuição do cimento no anular e evitar a prisão da coluna por diferencial de pressão. Em poços direcionais pode-se usar centralizadores rígidos, devido à possibilidade de “achatamento” total das lâminas do centralizador comum;

k) Arranhadores (*reciprocating cleaner*):

Tem a função de remover mecanicamente o reboco que se forma na parede do poço. Tal remoção é feita através dos movimentos verticais (reciprocacões) ou de rotação da coluna, empregando-se para cada caso o tipo de arranhador apropriado;

l) Obturador externo de revestimento ou ECP (*External Casing Packer*):

É um tipo de “*packer*” inflável permanente, instalado na coluna de revestimento para promover a obstrução do espaço anular em pontos críticos. Um de seus principais usos é para proteger zonas fracas, sensíveis ou de interesse da atuação da pressão hidrostática do cimento, sendo usualmente posicionado logo acima de tais zonas. Usa-se também logo abaixo do colar de estágio.

### 3.4 Etapas da operação de cimentação

A sequência operacional de uma cimentação primária típica e os preparativos para a cimentação começam antes mesmo da conclusão da descida do revestimento, com as atividades do ajuste da unidade, diluição de aditivos, etc. Uma cimentação primária típica tem a seguinte sequência:

- a) Montagem das linhas de cimentação;
- b) Circulação para condicionamento do poço. Simultaneamente é feita a preparação do colchão de lavagem;
- c) Injeção do colchão de lavagem e/ou espaçador;
- d) Teste de pressão das linhas de cimentação, usualmente feito com as linhas cheias de colchão de lavagem. As linhas são testadas até uma pressão superior à máxima pressão prevista durante a operação;
- e) Lançamento do tampão de fundo (opcional);
- f) Mistura da pasta mais leve, exemplo: 13,5 [lbm/gal], devendo cobrir o intervalo programado (normalmente 500 [m] do poço);

- g) Mistura da 2ª pasta, de custo mais elevado visa garantir uma cimentação mais eficiente da extremidade inferior, geralmente de 15,8 [lbm/gal], de maior resistência à compressão, normalmente cobrindo de 100 a 150 [m] da extremidade inferior da coluna;
- h) Lançamento do tampão de topo: em unidades marítimas flutuantes, o tampão de topo fica preso à ferramenta de assentamento, sendo liberado por meio de um tampão menor, lançado dentro da coluna de assentamento;
- i) Deslocamento com fluidos de perfuração ou água, com controle da vazão, pressão e volume. O deslocamento pode ser feito pela própria unidade de cimentação, quando o volume é pequeno, ou pelas bombas de lama. Neste caso, o controle do volume é feito pelo acompanhamento do número de ciclos da bomba;
- j) Pressurização do revestimento para assentamento do obturador externo do revestimento, (ECP) e teste de estanqueidade do revestimento. Esta pressurização só é possível quando há indicação positiva do tampão de topo ter atingido o colar retentor;
- k) Em caso de cimentação com sondas marítimas flutuantes deve-se ainda desconectar a ferramenta de assentamento, acionar o elemento de vedação do anular na cabeça do poço e retirar a coluna de assentamento;
- l) Em caso de coluna de *liner*, a ferramenta de assentamento é desconectada antes da cimentação e apoiada sobre o suspensor do *liner* (*liner hanger*) para a cimentação. Após a sua conclusão aplica-se peso ou rotação para assentamento do obturador (*liner packer*), opcional, e retira-se a coluna de assentamento;
- m) Descida da coluna com broca para corte das partes internas dos acessórios e do cimento residual entre o colar e a sapata.

### 3.5 Testes e avaliação do isolamento hidráulico

A avaliação da cimentação consiste na verificação do adequado posicionamento da pasta nas zonas de interesse e a qualidade da bainha de cimento quanto a sua resistência mecânica, uniformização em sua distribuição e aderência junto a formação e o revestimento. Vários métodos existem para essa finalidade, contudo nesta seção serão descritos em linhas gerais os dois métodos mais usuais:

- Testes Hidráulicos;
- Perfis sônicos.

#### 3.5.1 Testes Hidráulicos

O teste hidráulico busca avaliar a capacidade de isolamento hidráulico da bainha de cimento em sua extensão.

O teste de pressão positiva é conduzido no final da cimentação dos revestimentos de superfície e intermediário e consiste em duas etapas:

- Após a batida de *plug* o revestimento é pressurizado e o objetivo é testar a integridade do revestimento quanto a possíveis vazamentos enquanto a pasta está no seu estado líquido evitando-se assim prejudicar a sua aderência;
- O *formation integrity test* (FIT) ou *leak-off test* (LOT) é conduzido após o endurecimento do cimento perfurando-se através do *shoe track* -Figura 3.2- e adentrando alguns metros na formação. A pressão dentro do revestimento é aumentada gradativamente e monitorada. Uma queda de pressão pode indicar falhas na cimentação incorrendo em trabalhos de correção na região da sapata (*cement squeeze*). Caso a pressão se mantenha, o isolamento hidráulico é confirmado.

O teste de pressão negativa ou teste de influxo consiste em estabelecer um alívio da pressão interna do revestimento e monitorar influxos/variação de pressão de modo a conferir o isolamento hidráulico em ambas as direções. O teste de pressão negativa é utilizado para avaliar tampões de cimento, topo do *liner*, operações de *cement squeeze* e entre as etapas do teste de pressão positiva após o endurecimento da pasta (BENNETT, 2016).

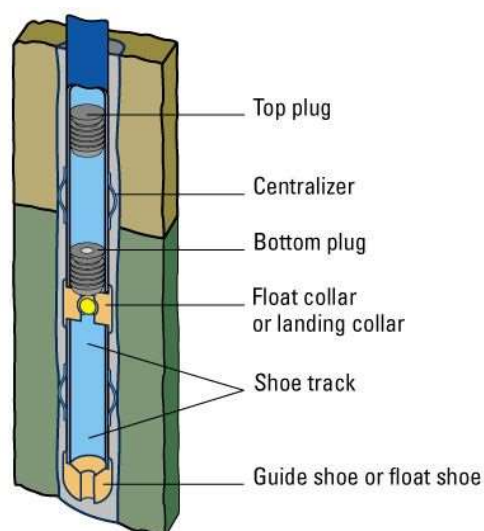


Figura 3.4 BHA para cimentação primária

(fonte: SLB Glossary - [https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/terms/s/shoe\\_track](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/terms/s/shoe_track)).



## 4 METODOLOGIA

Para facilitar a compreensão dos cálculos efetuados neste estudo, na sequência serão apresentadas as principais equações que descrevem uma operação de cimentação primária e seus valores exemplificados nas tabelas subsequentes. Os parâmetros utilizados foram extraídos aleatoriamente do conjunto de poços analisados visando conferir uma ordem de grandeza numérica real às tabelas. Todas as equações aqui descritas são amplamente conhecidas e podem ser acessadas em vários *handbooks* de perfuração e cimentação disponibilizados pelas principais prestadoras de serviços na área de construção de poços, (LAPEYROUSE et al., 2012).

### 4.1 Hidráulica de Cimentação

Quando a pasta de cimento está no período de transição, momento em que a adesão ao revestimento e formação ocorrem, o cimento torna-se sólido e a barreira hidrostática é reduzida pois somente o elemento líquido (água) e os demais fluidos acima irão exercer pressão hidrostática, daí a necessidade de se manter a operação *overbalance*, ou seja, exercer uma contrapressão a pressão de poros da formação, de modo a evitar qualquer influxo indesejado. Para tanto, nas operações em campo, devido ao dinamismo dessas atividades e aos contratempos, uma variedade de cálculos são realizados e revisados *in time* para tomadas de decisão visando garantir o sucesso e a segurança da operação. Em decorrência, busca-se desenvolver e apresentar as equações de modo a facilitar sua compreensão e aplicabilidade, tornando-as assim largamente utilizadas pela comunidade técnica.

#### 4.1.1 Equação da Potência Hidráulica

A potência hidráulica que um fluido incompressível pode entregar em dada posição (ponto de referência) ao fluir através de um conduto pode ser calculada pelo produto:

$$\dot{W}_h = Q_v \times P \quad (1)$$

Onde:

$\dot{W}_h$ : potência hidráulica;

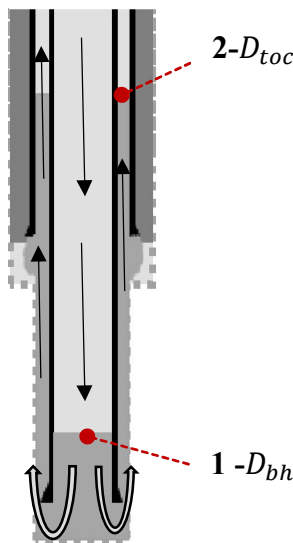
$Q_v$ : vazão volumétrica;

$P$ : pressão.

A aquisição dos dados de pressão, vazão, dentre outros, no fundo do poço e em tempo real já é de grande aplicação nas operações de perfuração direcional através da tecnologia MWD

(*Measure While Drilling*). Contudo, nas operações de cimentação, apesar desta tecnologia já ter sido adaptada para sensores permanentes de fundo, ainda não se tornou amplamente empregada ao nível do colar flutuante, este situado uma ou duas juntas acima da guia do revestimento, cuja função é prevenir o retorno do cimento para a coluna após seu deslocamento no anular.

Por sua vez, a aquisição dos dados é feita na superfície junto a unidade de cimentação, linha de retorno e tanque de lama, o que justifica a elaboração de uma metodologia para calcularmos a pressão e a vazão em dois pontos específicos: fundo do poço e topo do cimento. Todavia, o cálculo da potência hidráulica será dado imediatamente antes do término da circulação, ou seja, no instante imediatamente anterior a batida de *plug* e a normalização das pressões hidrostáticas da coluna e do anular. Contudo, para a obtenção da potência hidráulica no topo do cimento, é necessário considerar a vazão e pressão *in loco*, obtidos através da aplicação da equação fundamental da hidrodinâmica, Equação 2.



$$P_b + P_{hc} - \Delta P_C = P_r + P_{hA} + \Delta P_A \quad (2)$$

Onde temos as pressões [psi] e profundidades [m]:

$P_b$  : pressão da bomba de deslocamento positivo;

$P_{hc}$  : pressão hidrostática na coluna na profundidade;

$\Delta P_C$  : perda de carga na coluna;

$P_r$  : pressão na linha de retorno (choke manifold);

$P_{hA}$  : pressão hidrostática no anular na profundidade;

$\Delta P_A$  : perda de carga no anular;

$D_{toc}$  : profundidade real de topo do cimento poço;

$D_{bh}$  : profundidade real de fundo do cimento poço.

Figura 4.1: Deslocamento e pressões na coluna e anular do poço

#### 4.1.2 Pressão Total no Anular – Hidrostática e Dinâmica

Um poço e seu anular configuram um vaso comunicante em U, deste modo, durante a circulação e elevação do cimento, todo trabalho realizado pela unidade de cimentação e pela força gravitacional deverá transpor as resistências de forças de atrito do fluido no anular bem como a pressão hidrostática do anular preenchido pela pasta de cimento e demais fluidos acima composto principalmente pelo fluido de perfuração. Assim, para o fundo do poço, antes da batida de *plug* no colar flutuante, temos que a pressão total é dada pela Equação 3:

$$P_{bh} = P_{h1} + \Delta P_c + \Delta P_l \quad (3)$$

Para o topo do cimento, nas mesmas condições, temos na Equação 4:

$$P_{toc} = P_{h2} + \Delta P_l \quad (4)$$

Onde temos em [psi]:

$P_{bh}$ : pressão total no fundo poço;

$P_{h1}$ : pressão hidrostática do anular no fundo de poço;

$\Delta P_c$ : perda de carga do cimento no anular;

$\Delta P_l$ : perda de carga da lama no anular;

$P_{toc}$ : pressão total no topo do cimento;

$P_{h2}$ : pressão hidrostática do anular no topo do cimento.

As pressões hidrostáticas no fundo do poço e no topo do cimento são obtidas através da somatória de todas as pressões hidrostáticas exercidas pela coluna de cada fluido deslocado ao longo da programação de bombeamento e, adicionalmente, a perda de pressão por atrito no anular que neste estudo serão considerados o atrito do fluido de condicionamento do poço, comumente chamado de lama (fluido de perfuração), e a pasta de cimento. Temos então para a pressão hidrostática o somatório abaixo:

$$P_h = \sum_{i=1}^n 0,17 \frac{V_i \rho_i}{Cap_a} \quad (5)$$

Onde:

$P_h$ : pressão hidrostática a determinada profundidade, [psi];

$n$ : quantidade de fluidos que compõem o programa de bombeamento;

$V_i$ : volume total do fluido  $i$  bombeado, [bbl];

$Cap_a$ : volume específico para preenchimento do anular de um poço de diâmetro *bore* 12-1/4" e diâmetro externo do revestimento de produção de 9-5/8" na extensão de um metro, aqui adotado em 0,183 [bbl/m];

$\rho_i$ : densidade do fluido, [lbm/gal];

A referência para profundidades verticais, linha zero, adotada para os cálculos ao longo deste trabalho é o nível do *mud return line* no leito marinho, desconsiderando-se assim a

extensão vertical entre a conexão submarina do *riser* e a mesa rotativa e a respectiva a pressão hidrostática exercida pelo fluido contido neste intervalo.

A Tabela 2 apresenta um exemplo do somatório das respectivas pressões hidrostáticas no fundo do poço ( $P_{h1}$ ) para uma típica operação de cimentação primária composta de colchões de lavagem, deslocamento e pasta de cimento, adotando-se 0,183 [bbl/m] para a capacidade do anular e profundidade vertical total de 5.518 [m] não sendo descontado a extensão do *shoe track*.

Tabela 2: Exemplo de cálculo da  $P_{h1}$

| Fluido                                                 | $\rho_i$<br>[lbm/gal] | $V_i$ [bbl] | $L_f$ [m] | $P_h$ [psi] |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|-----------|-------------|
| Fluido de Perfuração                                   | 10,5                  | 820         | 4480      | 7998        |
| Colchão de Lavagem                                     | 9,9                   | 100         | 546       | 920         |
| Pasta de Cimento                                       | 16,2                  | 90          | 492       | 1354        |
| Profundidade total vertical - $D_{bh}$ [m]             |                       |             | 5518      |             |
| Pressão hidrostática no fundo do poço - $P_{h1}$ [psi] |                       |             | 10272     |             |

A Tabela 3 apresenta um exemplo do somatório das respectivas pressões hidrostáticas para a pressão hidrostática no topo do cimento ( $P_{h2}$ ) excetuando-se a pasta de cimento. Foi adotado 0,183 [bbl/m] para a capacidade do anular e profundidade vertical do topo do cimento em 5.026 [m].

Tabela 3: Exemplo de cálculo da  $P_{h2}$

| Fluido                                                   | $\rho_i$ [lbm/gal] | $V_i$ [bbl] | $L_f$ [m] | $P_h$ [psi] |
|----------------------------------------------------------|--------------------|-------------|-----------|-------------|
| Fluido de Perfuração                                     | 10,5               | 820         | 4480      | 7998        |
| Colchão de Lavagem                                       | 9,9                | 100         | 546       | 920         |
| Profundidade vertical - $D_{toc}$ [m]                    |                    |             | 5026      |             |
| Pressão hidrostática no topo do cimento - $P_{h2}$ [psi] |                    |             | 8918      |             |

Para o desenvolvimento dos cálculos da pressão dinâmica é necessário o estudo das vazões no anular. Uma vez concluída a apresentação do conceito as pressões de atrito virão na sequência.

#### 4.1.3 Vazão Efetiva no Topo do Cimento e Vazão de Deslocamento da Bomba

A operação de bombeamento de pasta de cimento tem taxas de vazão que variam de acordo com o tipo de fluido bombeado e ao longo de toda a operação. Uma restrição no fluxo do anular, normalmente imprevistas, por exemplo, ocasionada pela descentralização do revestimento ou desmoronamento da parede do poço, tem impacto direto nas pressões observadas na unidade de cimentação.

O deslocamento da pasta cimento poderá vir acompanhado de um tampão de cauda (*plug*) cuja função é atuar como elemento isolante impedindo a interface entre a pasta e o colchão de deslocamento e, por conseguinte, a mistura e a contaminação da pasta de cimento. Comumente adotado nas operações de cimentação primária, água do mar seguida de lama de perfuração são utilizados para o deslocamento final da pasta de cimento que indicará o término da operação após pico de pressão observado no interior da coluna devido a ocorrência de batida do *plug* no colar flutuante e subsequente interrupção da vazão e pressurização da coluna.

Para não exceder limites operacionais do equipamento (unidade de cimentação) e do sistema como um todo, a vazão é constantemente ajustada. Porém, boas práticas de cimentação primária definiram algumas vazões adotadas para cada fluido programado em função de suas características reológicas e a interação com as paredes do poço conforme exemplo mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Exemplo de volume e vazão numa cimentação primária da fase de produção

| Fluido                    | $V$ [bbl] | $Q_b$ [bbl/min] |
|---------------------------|-----------|-----------------|
| Fluido de Condicionamento | 400       | 8,0             |
| Colchão de Lavagem        | 80        | 6,0             |
| Pasta de Cimento          | 120       | 7,0             |
| Colchão de Deslocamento   | 30        | 8,0             |
| Fluido de Perfuração      | 950       | 14,0            |

O condicionamento do poço nos permite saber de antemão o quanto a formação absorve do fluido na condição de infiltração, com valores até 2 [bbl/min]. Para grandes perdas, um tratamento de contenção de perda com materiais adequados (fibras) pode ser conduzido antes do deslocamento da pasta. Deste modo é possível projetar a operação considerando um volume adicional de cimento para compensar o volume perdido para a formação. Uma vez que as vazões de bomba e retorno são monitoradas, o volume total de perdas é obtido com determinada precisão, contudo não é possível saber a distribuição desse volume perdido entre os fluidos que compõem a programação de bombeamento. Por conseguinte, a pasta de cimento é o volume mais crítico e os dados obtidos em campo atestam um zelo maior no monitoramento da linha de retorno quando da chegada da frente de cimento no colar flutuante até batida de *plug*.

De posse dos volumes totais de pasta cimento, volumes de perda de cimento (dados de campo); da vazão da bomba ( $Q_b$ ) é possível o cálculo da vazão de perdas ( $Q_p$ ) e da vazão efetiva ( $Q_e$ ) conforme desenvolvimento abaixo:

$$Q_e = Q_b - Q_p \quad (6)$$

$$Q_p = \frac{V_p}{t_b} \quad (7)$$

$$Q_b = \frac{V_t}{t_b} \therefore t_b = \frac{V_t}{Q_b} \quad (8)$$

Substituindo (8) em (7):

$$Q_p = \frac{V_p}{\left(\frac{V_t}{Q_b}\right)} \quad (9)$$

Substituindo (9) em (6):

$$Q_e = Q_b - \frac{V_p}{\left(\frac{V_t}{Q_b}\right)} \quad (10)$$

Onde:

$Q_p$ : vazão de perda de cimento, [bbl/min];

$Q_e$ : vazão efetiva no topo do cimento, [bbl/min];

$Q_b$ : vazão da unidade de cimentação, [bbl/min];

$V_t$ : volume total de cimento bombeado, [bbl];

$V_p$ : volume de perda de cimento, [bbl];

$t_b$ : tempo total de bombeamento do cimento, [min].

Nos dados obtidos, o volume de cimento bombeado que efetivamente preencheu a extensão projetada não é apresentado, entretanto esse volume pode ser calculado uma vez que a extensão vertical do TOC seja informada. O volume de perdas é um dado registrado nas operações, daí temos o exemplo na Tabela 5. A vazão de fundo de poço para todos os fins será a mesma vazão da bomba da unidade de cimentação.

Tabela 5: Exemplo das vazões efetivas no topo do cimento

| Poço | $L_f$ [m] | $V_t$ [bbl] | $V_p$ [bbl] | $Q_b$ [bbl/min] | $t_b$ [min] | $Q_e$ [bbl/min] |
|------|-----------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| 1    | 650       | 119         | 0           | 14,0            | 8,5         | 14,0            |
| 2    | 550       | 121         | 20          | 14,0            | 8,6         | 11,7            |
| 3    | 450       | 122         | 40          | 14,0            | 8,7         | 9,4             |
| 4    | 350       | 124         | 60          | 14,0            | 8,9         | 7,2             |
| 5    | 150       | 107         | 80          | 14,0            | 7,7         | 3,6             |

Supondo uma extensão ( $L_f$ ) de 650 [m], o volume de pasta efetiva de cimento para preencher o anular será de 119 [bbl]. Ao simularmos a redução da extensão devido a perda de volume da pasta para a formação, temos uma vazão de perda ( $Q_p$ ) e por conseguinte a vazão efetiva ( $Q_e$ ) no topo do cimento conforme os cenários da tabela acima.

#### 4.1.4 Pressão Dinâmica e Perdas de Pressão por Atrito

As perdas por atrito, por se tratar de fluidos não-Newtonianos em sua maioria, fluido de perfuração e pasta de cimento, serão calculadas através do modelo reológico *Power-Law* (FOX et al., 2010) cujas equações foram adaptadas e convertidas para as unidades de medida utilizadas neste estudo. Para tanto faz-se necessário a obtenção dos valores de velocidade de escoamento no anular ( $v_a$ ), o Número de Reynolds ( $Re$ ), e o fator de atrito ( $f$ ) que por sua vez depende dos índices adimensionais de consistência e comportamento de fluxo, respectivamente ( $K$ ) e ( $n$ ) do modelo reológico *Power-Law*.

A velocidade de deslocamento no anular é dada pela Equação 11:

$$v_a = \frac{5,23Q_e}{D_p^2 - D_c^2} \quad (11)$$

Onde:

$v_a$ : velocidade de deslocamento no anular, [m/s];

$Q_e$ : vazão efetiva de deslocamento, [bbl/min];

$D_p$ : diâmetro do poço, [in];

$D_c$ : diâmetro externo da coluna, [in];

Para diâmetro externo dos poços estudados, foi considerado o diâmetro de broca de 12-1/4" e diâmetro externo do revestimento de produção em 9-5/8". Na Tabela 6 temos um exemplo do cálculo da velocidade de deslocamento.

Tabela 6: Exemplo das velocidades de deslocamento

| Poço | $L_f$ [m] | $V_t$ [bbl] | $V_p$ [bbl] | $Q_b$ [bbl/min] | $t_b$ [min] | $v_a$ [m/s] |
|------|-----------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| 1    | 650       | 119         | 0           | 8,5             | 14,0        | 1,27        |
| 2    | 550       | 121         | 20          | 8,6             | 11,7        | 1,06        |
| 3    | 450       | 122         | 40          | 8,7             | 9,4         | 0,86        |
| 4    | 350       | 124         | 60          | 8,9             | 7,2         | 0,66        |
| 5    | 150       | 107         | 80          | 7,7             | 3,6         | 0,33        |

O Número de Reynolds para o fluxo no anular no modelo reológico *Power-Law* é obtido através da Equação 12 adaptada às unidades métricas e aos diâmetros dos revestimentos adotados neste trabalho (MITCHELL; MISKA, 2011).

$$Re = \frac{1,86(3,281v_a)^{2-n}\rho}{K \cdot \left(\frac{96}{D_p - D_c}\right)^n} \quad (12)$$

Onde os índices ( $K$ ) e ( $n$ ) são obtidos através dos ensaios de laboratório utilizando-se do viscosímetro rotacional onde se leem os ângulos de deflexão ( $\phi$ ) nas rotações de 600 rpm e 300 rpm na Equação 12 e 13, ou através da viscosidade plástica ( $\mu_0$ ) e limite de escoamento ( $\tau$ ).

$$n = 3,32 \log_{10} \frac{\phi_{600}}{\phi_{300}} \quad (13)$$

$$\text{onde: } \phi_{600} = 2\mu_0 + \tau; \quad \phi_{300} = \mu_0 + \tau$$

$$K = \frac{\phi_{600}}{511^n} \quad (14)$$

Onde:

$\mu_0$ : viscosidade plástica do fluido, [cP];

$\tau$ : limite de escoamento, [lbf/100 ft<sup>2</sup>].

Para a pasta de cimento, a NBR 9831 admite os valores limites de 55 [cP] para viscosidade plástica ( $\mu_0$ ) e de 30 a 70 [lbf/100 pés<sup>2</sup>] para limites de escoamento ( $\tau$ ), sob pressão e temperatura (27°C) atmosféricas.

Os índices de consistência ( $K$ ) e comportamento de fluxo ( $n$ ) para o cimento base, cujo padrão utilizado no pré-sal é o Classe G, não foi disponibilizado junto a operadora, deste modo adotou-se da literatura técnica disponível os valores 0,30 para ( $n$ ) e 0,195 para ( $K$ ) (SMITH,1987).

A Tabela 7 nos apresenta o cálculo do Número de Reynolds para as condições acima.

Tabela 7: Exemplo do Número de Reynolds

| Poço | $L_f$ [m] | $V_t$ [bbl] | $V_p$ [bbl] | $Q_b$ [bbl/min] | $v_a$ [m/s] | $Re$ |
|------|-----------|-------------|-------------|-----------------|-------------|------|
| 1    | 650       | 119         | 0           | 14,0            | 1,27        | 498  |
| 2    | 550       | 121         | 20          | 11,7            | 1,06        | 416  |
| 3    | 450       | 122         | 40          | 9,4             | 0,86        | 335  |
| 4    | 350       | 124         | 60          | 7,2             | 0,66        | 257  |
| 5    | 150       | 107         | 80          | 3,6             | 0,33        | 127  |

Dado que o regime de escoamento no anular para as vazões de deslocamento em estudo apresentou o Número de Reynolds abaixo de 2100, tal condição é suficiente para classificá-lo como fluxo laminar, assim temos o fator de atrito ( $f$ ) adimensional conforme Equação 15.

$$f = \frac{16}{Re} \quad (15)$$

Por conseguinte, a pasta de cimento de densidade ( $\rho$ ) apresentará uma perda de pressão por atrito ( $\Delta P_c$ ) ao ser deslocada na extensão ( $L$ ) obtida através da Equação 16. Na Tabela 8 temos os cálculos exemplificados.

$$\Delta P_c = \frac{0,128\rho L v_a^2 f}{Dp - Dc} \quad (16)$$

Onde:

$\Delta P_c$ : perda de carga da pasta de cimento, [psi];

$\rho$ : densidade da pasta de cimento, [lbm/gal];

$L$ : extensão da zona cimentada, [m];

$v_a$ : velocidade de deslocamento no anular ou interior da coluna, [m/s];

$f$ : fator de atrito adimensional;

$Dp$ : diâmetro do poço, [in];

$Dc$ : diâmetro externo da coluna, [in];

Tabela 8: Exemplo da perda de carga por atrito do cimento no anular

| Poço | $L_f$ [m] | $Q_e$ [bbl/min] | $v_a$ [m/s] | $Re$ | $f$    | $\Delta P_c$ [psi] |
|------|-----------|-----------------|-------------|------|--------|--------------------|
| 1    | 650       | 14,0            | 1,27        | 498  | 0,0321 | 223                |
| 2    | 550       | 11,7            | 1,06        | 416  | 0,0385 | 227                |
| 3    | 450       | 9,4             | 0,86        | 335  | 0,0477 | 230                |
| 4    | 350       | 7,2             | 0,66        | 257  | 0,0622 | 233                |
| 5    | 150       | 3,6             | 0,33        | 127  | 0,1257 | 202                |

Para o cálculo da pressão de atrito da coluna de fluidos acima do cimento, majoritariamente lama de perfuração, foi adotada a Equação 17 (BOURGOYNE; MILLHEIM; CHENEVERT, 1984) que nos permite calcular um valor aproximado dado a indisponibilidade de informações sobre as características reológicas da lama (fluido de perfuração), Tabela 9.

$$\Delta P_l = 5,059 \times 10^{-7} \rho_l L \left( \frac{Q_e}{Cap_a} \right)^2 \left( \frac{1}{D_p - D_c} \right) \quad (17)$$

Onde:

$\Delta P_l$  : perda de carga da lama por atrito no anular, [psi];

$\rho_l$ : densidade da lama, [lbm/gal];

$L$ : extensão da zona cimentada, [m];

$Q_e$ : vazão efetiva no topo do cimento, [bbl/min];

$Cap_a$ : capacidade do anular, 0183 [bbl/m];

$D_p$ : diâmetro do poço, [in];

$D_c$ : diâmetro externo da coluna, [in].

Tabela 9: Exemplo da perda de carga por atrito da lama no anular

| Poço | $L_f$ [m] | $\rho_l$ [lbm/gal] | $Q_e$ [bbl/min] | $\Delta P_l$ [psi] |
|------|-----------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 1    | 650       | 9,9                | 14,0            | 73                 |
| 2    | 550       | 9,9                | 11,7            | 61                 |
| 3    | 450       | 9,9                | 9,4             | 50                 |
| 4    | 350       | 9,9                | 7,2             | 39                 |
| 5    | 150       | 9,9                | 3,6             | 17                 |

#### 4.1.5 Potência Hidráulica no Fundo do Poço

Tendo as vazões e pressões determinadas, o produto nos retorna a potência hidráulica nas profundidades em análise visto que para o fundo do poço a vazão considerada é a vazão de bomba e para o topo do cimento a vazão considerada é a vazão efetiva, ou seja, descontada das perdas de volume. Temos então na Equação 18:

$$\dot{W}_{bh} = 0,0243 Q_b P_{bh} \quad (18)$$

Onde:

$\dot{W}_{bh}$ : potência hidráulica de fundo do poço, [hp];

Substituindo (3) e (7) em (18) obtém-se a potência hidráulica em função da hidrostática e das perdas de carga no fundo do poço:

$$\dot{W}_{bh} = 0,0243 \frac{V_t}{t_b} (P_{h1} + \Delta P_c + \Delta P_l) \quad (19)$$

#### 4.1.6 Potência Hidráulica e Potência Dissipada no Topo do Cimento

De acordo com a Lei da Conservação da Massa e da Energia, uma parte dessa energia foi dispendida ao deslocar o volume de pasta de cimento absorvida pelo reservatório. Assim podemos concluir que uma certa potência foi dissipada junto ao volume de perdas por infiltração no reservatório que não ultrapassou a extensão total da coluna de cimento.

Para a potência hidráulica no topo do cimento temos a Equação 20

$$\dot{W}_{toc} = \dot{W}_u + \dot{W}_d \quad (20)$$

Onde para a potência útil  $\dot{W}_u$  temos:

$$\dot{W}_u = 0,0243 Q_e P_{toc} \quad (21)$$

Substituindo (10) em (21)

$$\dot{W}_u = 0,0243 Q_e (P_{h2} + \Delta P_l) \quad (22)$$

E para a potência dissipada  $\dot{W}_d$ :

$$\dot{W}_d = 0,0243 Q_p P_{toc} \quad (23)$$

Substituindo as equações (10) em (23)

$$\dot{W}_d = 0,0243 Q_p (P_{h2} + \Delta P_l) \quad (24)$$

Substituindo as equações (4), (6), (10) e (11) na equação (20) obtém-se a potência hidráulica em função da hidrostática e das perdas de carga no topo do cimento:

$$\dot{W}_{toc} = 0,0243 Q_b (P_{h2} + \Delta P_l) \quad (25)$$

Onde ( $\dot{W}_{toc}$ ) é a potência hidráulica total teórica no topo do cimento [hp].

Da relação entre a potência útil e a potência total teórica podemos extrair o rendimento  $\eta'$  conforme equação abaixo:

$$\eta' = \frac{\dot{W}_u}{\dot{W}_{toc}} \quad (26)$$

Em decorrência, entre o fundo do poço e o topo do cimento, obtém-se a diferença de potência hidráulica ( $\Delta \dot{W}$ ) empregada no deslocamento da pasta de cimento conforme a Equação 27:

$$\Delta \dot{W} = (\dot{W}_{bh} - \dot{W}_{toc}) \eta' \quad (27)$$

Quando não houver perdas de volume, a vazão de fundo e topo do cimento serão as mesmas, neste caso o coeficiente de rendimento ( $\eta'$ ) será igual a 1. A Tabela 10 apresenta o cálculo da diferença de potência hidráulica para o poço em cinco situações simulando volumes de perda da pasta para formação permeável.

Tabela 10: Exemplo das potências hidráulicas de fundo do poço e topo do cimento

| Poço | $L_f$<br>[m] | $Q_e$<br>[bbl/min] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_u$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\eta'$ | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|------|--------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|--------------------------|
| 1    | 650          | 14,0               | 3359              | 2678               | 3359                   | 2678                | 0                   | 2678                    | 1,00    | 680                      |
| 2    | 550          | 11,7               | 3318              | 2277               | 3318                   | 2277                | 452                 | 2729                    | 0,83    | 491                      |
| 3    | 450          | 9,4                | 3276              | 1871               | 3276                   | 1871                | 909                 | 2780                    | 0,67    | 334                      |
| 4    | 350          | 7,2                | 3235              | 1461               | 3235                   | 1461                | 1369                | 2831                    | 0,52    | 209                      |
| 5    | 150          | 3,6                | 3140              | 749                | 3140                   | 749                 | 2183                | 2932                    | 0,26    | 53                       |

#### 4.1.7 Indicador de Qualidade da Cimentação IQC

Foi mostrado que a sequência de fluidos bombeados na operação varia de projeto a projeto, assim, cada poço apresentará suas respectivas potências hidráulicas dadas a sua programação de bombeio e ocorrências ou não de perdas. Por conseguinte, seria irrazoável compararmos diferentes projetos de cimentação primária e operações distintas em valores absolutos de potências hidráulicas. Contudo é possível extrairmos alguns coeficientes de rendimento a fim de possibilitar, em certo grau, a comparação entre as operações como proposto na metodologia abaixo.

$$\eta_1 = \frac{\Delta W}{L} \quad (28)$$

O coeficiente ( $\eta_1$ ) [hp/m] representa um parâmetro que expressa o quanto de potência foi aplicada por metro de coluna de cimento ao término da operação e que pode ser comparado a um coeficiente padrão ( $\eta_2$ ) [hp/m] esperado para cada operação, conforme equação que considera a densidade do cimento e a densidade equivalente das perdas por atrito para uma extensão de 1 metro, vide Equação 29:

$$\eta_2 = 4,13 \cdot 10^{-3} Q_b \left[ \rho_c + \left( \frac{\Delta P_c + \Delta P_l}{0,17L} \right) \right] \quad (29)$$

Dos rendimentos acima podemos obter o Coeficiente de Desempenho do Cimento (*CDC*) conforme a Equação 30:

$$CDC = \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (30)$$

O atingimento do topo do cimento na altura projetada é fator crucial para a avaliação da operação de cimentação, embora este não seja o único fator relevante uma vez que a avaliação do isolamento considera diferentes critérios para análise conforme será mostrado a seguir na Tabela 11, propõem-se aqui um Coeficiente de Extensão (*CE*) da coluna de cimento obtido pela divisão entre a extensão real pela extensão projetada conforme Equação 31:

$$CE = \frac{L}{L_p} \quad (31)$$

O produto entre os coeficientes ( $CDC$ ) e ( $CE$ ) nos fornece o Indicador de Qualidade da Cimentação ( $IQC$ ) conforme a Equação 32, exemplificados na Tabela 11.

$$IQC = CDC \times CE \quad (32)$$

Tabela 11: Exemplo de cálculo dos coeficientes de rendimento

| Poço | $L_p$ [m] | $L$ [m] | $\Delta\dot{W}$ [hp] | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ |
|------|-----------|---------|----------------------|----------|----------|-------|------|-------|
| 1    | 500       | 650     | 680                  | 1,05     | 1,08     | 0,96  | 1,30 | 1,25  |
| 2    | 500       | 550     | 491                  | 0,89     | 1,11     | 0,81  | 1,10 | 0,89  |
| 3    | 500       | 450     | 334                  | 0,74     | 1,14     | 0,65  | 0,90 | 0,59  |
| 4    | 500       | 350     | 209                  | 0,60     | 1,19     | 0,50  | 0,70 | 0,35  |
| 5    | 500       | 150     | 53                   | 0,35     | 1,43     | 0,25  | 0,30 | 0,07  |

O indicador ( $IQC$ ), para fins de análise estatística, apresenta-se como uma variável quantitativa contínua onde, para um único poço em 5 cenários hipotéticos de perda de volume de pasta de cimento, pode-se observar o impacto na altura final do topo de cimento desde o atingimento do topo do cimento com excedente de altura e sem perdas de cimento obtendo assim o  $IQC$  de valor 1,25 e decrescendo na medida em que os volumes de perdas ocorrem até o outro extremo, onde o topo do cimento não foi atingido e a perda de volume de cimento foi demasiada obtendo-se por fim o  $IQC$  mínimo de 0,07.

#### 4.1.8 Limites Máximo e Mínimo do IQC

Devido ao fato das operações de cimentação considerarem para fins operacionais uma margem de segurança quanto ao volume da pasta de cimento em vista de imprecisões no cálculo do volume anular bem como possíveis perdas da pasta para a formação, o excedente implica não raramente que o topo do cimento ( $L$ ) ultrapasse o topo de cimento projetado ( $L_p$ ) impactando diretamente no cálculo final do indicador, deste modo, um valor máximo para  $IQC$  foi estabelecido conforme notação abaixo, assim, o produto dos coeficientes  $CDC$  e  $CE$  estará limitado a valores iguais ou inferiores a 1.

$$0 \leq IQC \leq 1 \quad (31)$$

A adoção de um limite máximo pode ser corroborada pela aplicação de ferramentas matemáticas da estatística descritiva. Ao representarmos graficamente  $IQC$  vs.  $\Delta\dot{W}$ , Figura 4.2, para o conjunto de poços estudados, verificou-se uma dispersão menor se comparado a

dispersão obtida para os resultados na hipótese de um *IQC* sem limite superior máximo, Figura 4.3.

O coeficiente de correlação de Pearson, também chamado de "coeficiente de correlação produto-momento", mede o grau da correlação entre duas variáveis de escala métrica. Este coeficiente, normalmente representado por  $r$  assume apenas valores entre 1, linearmente positivo, e -1, linearmente negativo. Um coeficiente de correlação  $r$  próximo de zero indica que não há relação entre as duas variáveis, e quanto mais próximo de 1 ou -1, mais forte é a relação entre as variáveis.

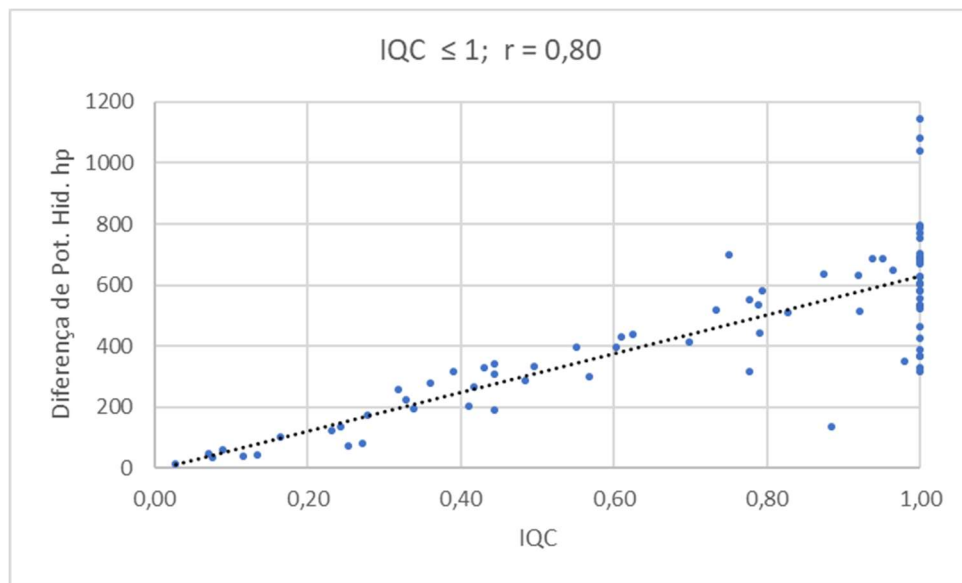


Figura 4.3 Dispersão para IQC com limite superior.

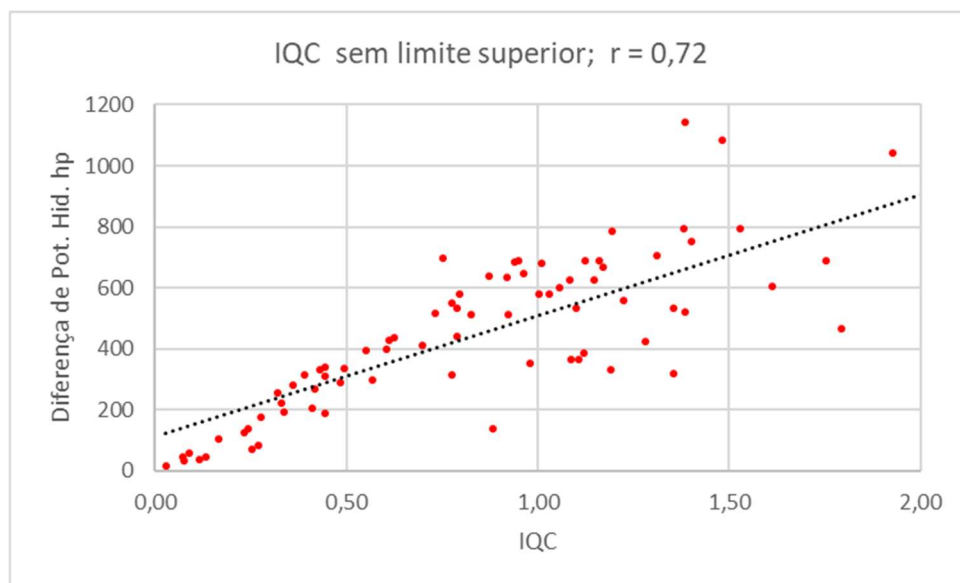


Figura 4.2 Dispersão para IQC sem limite superior.

Por não ser possível definir um valor absoluto de IQC para as classificações “excelente”, “bom”, “médio”, “ruim” e “péssimo”, uma forma de representação gráfica e qualitativa do IQC e seu desempenho para o campo ou grupo de poços é pelo emprego de um potenciômetro cromático exemplificado na Figura 4.4, que ilustra através de um gradiente de cores a difusividade do IQC para o grupo de poços analisados, facilitando sobremaneira a classificação visual e interpretação do resultado em uma escala padronizada.

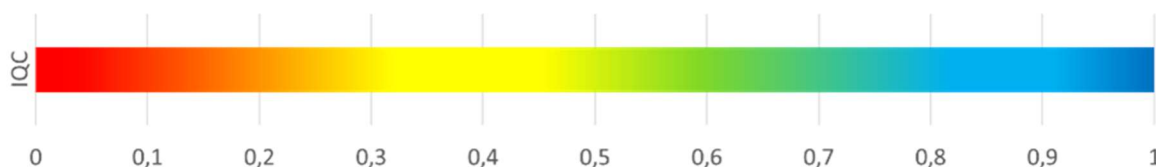


Figura 4.4: Gradiente cromático do IQC para o conjunto de poços analisados.

## 4.2 Coleta de Dados

Para se efetuar uma análise estatística quanto à qualidade do isolamento das cimentações primárias é necessário a coleta de uma série de dados a seguir: parâmetros operacionais; características reológicas dos fluidos empregados; profundidades verticais do poço e completação; posicionamento das sapatas, bem como boletins diários, relatório de revestimento e cimentação, e interpretação de perfis de verificação de cimentação tais como CBL/VDL. Dessas informações é possível o cálculo da potência hidráulica aplicada na base do reservatório (sapata inferior do revestimento de produção) e topo do cimento, possibilitando-nos correlacionar a diferença de potência hidráulica entre base e topo e a qualidade do isolamento obtido.

Ao se calcular a potência hidráulica aplicada na base da formação produtora ao final do deslocamento, deve-se considerar: a vazão e a pressão no início (quando o colchão lavador chega na sapata) e no final do bombeio; as densidades e volumes do fluido de deslocamento dentro da coluna e do cimento no *shoe track* (cimento no revestimento entre colar flutuante e a sapata); as densidades e volumes dos fluidos presentes no anular (fluido de perfuração utilizado, colchão lavador, colchão espaçador, pasta de cimento); as capacidades do revestimento, coluna de assentamento e anulares para converter os volumes em altura, ou seja, o diâmetro interno da coluna de assentamento, os diâmetros interno e externo do revestimento e o diâmetro da broca para inferir o diâmetro médio do poço.

A pressão de fratura obtida através do teste de absorção da sapata anterior e a ocorrência de perdas para a formação são limitadores operacionais no que concerne a pressão máxima de

operação ao longo da cimentação primária, daí temos que para o cálculo de uma taxa de sucesso operacional, a contextualização da operação (se a cimentação primária foi feita em conjunto ou não com rocha capeadora e a formação produtora, o reservatório) deve estar enquadrada em uma das categorias previamente ilustradas na Figura 3.1 Principais configurações de poços do pré-sal, fases e revestimentos.

Por fim, para avaliar a obtenção do isolamento desejado é preciso verificar a extensão que foi cimentada em relação à projetada, isto é, a posição do topo de cimento obtido comparado ao topo do cimento projetado. Tal avaliação é feita através da interpretação de perfis sônicos de verificação de cimento. O relatório de revestimento e cimentação e boletins diários fornecem informações sobre o esquema de poço onde se realizou a cimentação, a ocorrência de algum problema operacional (ajuste de peso da pasta ou perda de circulação, por exemplo) e se houve uma correção da cimentação (o que é uma evidência de que não se obteve os isolamentos necessários na cimentação primária).

Os dados analisados foram obtidos através do compartilhamento de um histórico de avaliações conduzido pela maior operadora local cujo objetivo era avaliar e qualificar as operações de cimentação primária da fase de produção dos poços distribuídos ao longo dos campos do pré-sal brasileiro. Por questões de confidencialidade, a identificação dos campos e a nomenclatura dos poços foram alterados sem prejuízo da informação, assim, temos a distribuição conforme a Figura 4.1, em alusão aos elementos da mitologia grega.

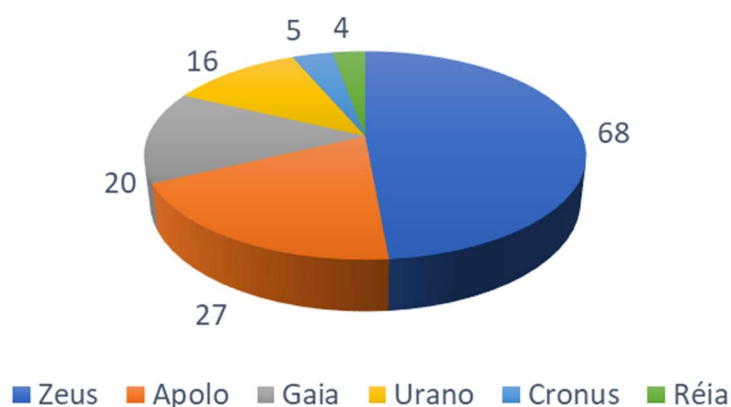


Figura 4.5: Distribuição dos poços e os campos produtores

Foram registrados os detalhes operacionais de 140 poços distribuídos em 6 campos localizados na bacia continental petrolífera dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, no entanto alguns poços foram excluídos do estudo devido às inconsistências ou falta de dados,

por exemplo: a não informação da profundidade do topo do cimento, diâmetro do revestimento, entre outros, resultando no total de 118 poços para análise, vide Figura 4.2.

Para uma melhor análise dos parâmetros e para fins de comparabilidade, os campos foram agrupados em 2 conjuntos distintos tomando por base as profundidades de fundo do poço e profundidade do topo do cimento, conforme descrito na Tabela 12.

Assim, verificou-se que os campos de Zeus, Urano e Cronos são compatíveis nos quesitos de profundidade média: em torno de 5200 [m] para o fundo de poço; 4500 [m] para a profundidade média do topo do cimento, formando então o grupo ZUC.

O segundo grupo, RAG (Reia-Apolo-Gaia), foram agrupados em função das profundidades médias de fundo de poço por volta dos 5800 [m] e topo do cimento em 5000 [m]. Na Figura 4.2 estão apresentadas a distribuição e a classificação dos 78 poços do grupo ZUC e 40 poços do grupo RAG, conforme critérios da Tabela 13.

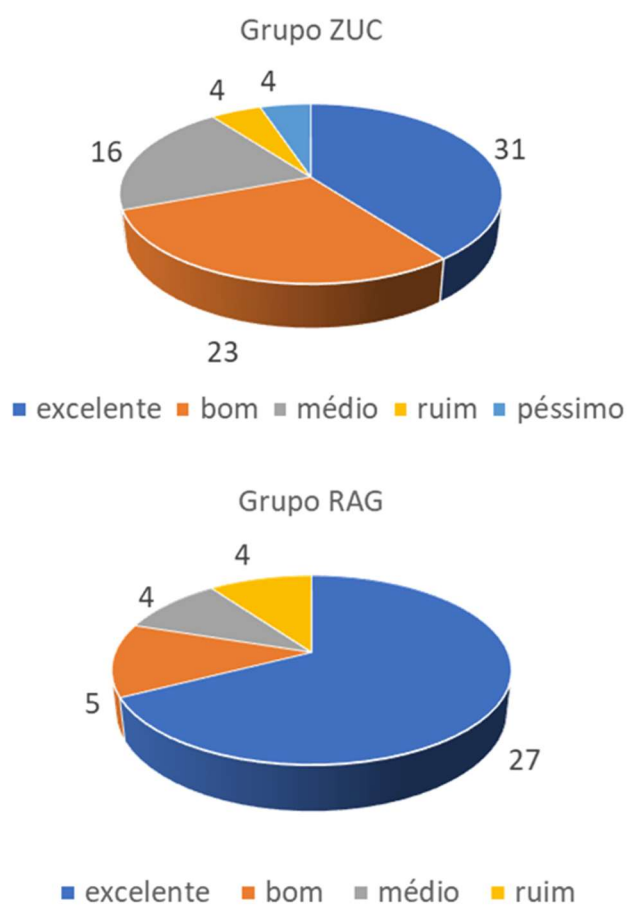
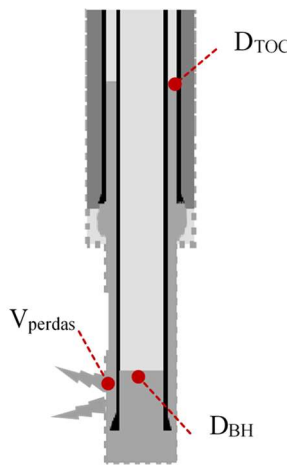


Figura 4.6: Redistribuição e classificação dos poços ZUC e RAG

Tabela 12: Reagrupamento dos campos conforme profundidades médias



| Campo  | nº de poços | $\bar{D}_{BH}$ [m] | $\bar{D}_{TOC}$ [m] | $\bar{V}_{perdas}$ [bbl] |
|--------|-------------|--------------------|---------------------|--------------------------|
| Zeus   | 60          | 5202               | 4603                | 104                      |
| Urano  | 13          | 5290               | 4633                | 63                       |
| Cronos | 5           | 5134               | 4454                | 154                      |
| Reia   | 4           | 5793               | 5039                | 134                      |
| Apolo  | 25          | 5935               | 5011                | 205                      |
| Gaia   | 11          | 5629               | 5001                | 138                      |

O critério para se avaliar e classificar o resultado da operação de cimentação primária está baseada na leitura e interpretação dos perfis sônicos CBL/VDL por grupo de especialistas da operadora dos quais, após inferências, foram extraídos o percentual da extensão de cimento preenchido nas zonas de interesse e classificados segundo critérios abaixo, vide Tabela 13 extraído de Lima (2018);

Tabela 13: Classificação e critérios quanto ao isolamento hidráulico (LIMA,2018).

| Classificação | Crítérios                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Excelente     | Atingiu todos os isolamentos requeridos. Inferência de isolamento hidráulico no mínimo em 70% do trecho cimentado.                                                                                                        |
| Bom           | Atingiu todos os isolamentos requeridos. Inferência de isolamento hidráulico de 30% a 69% do trecho cimentado.                                                                                                            |
| Médio         | Atingiu todos os isolamentos requeridos. Inferência de isolamento hidráulico em menos de 30% do trecho cimentado.                                                                                                         |
| Ruim          | Não atingiu um ou nenhum dos isolamentos requeridos. Apesar de pelo menos um isolamento hidráulico não ter sido obtido, o perfil indica presença de cimento e boa qualidade da cimentação em outros intervalos cimentados |
| Péssimo       | Não atingiu nenhum dos isolamentos requeridos. Características de revestimento livre em todo o trecho perfilado.                                                                                                          |

## 5 RESULTADOS

Ao aplicarmos a metodologia de cálculo para a obtenção das potências hidráulicas, dos rendimentos, dos coeficientes CDC, CE e do indicador IQC, foram obtidos os seguintes resultados distribuídos com base na classificação dos perfis sônicos da cimentação para cada um dos grupos (ZUC e RAG), conforme as Tabelas 14 e 15.

### 5.1 Aplicação dos Cálculos

Nas tabelas seguintes, enquanto que os demais valores são apresentados como valores médios, o IQC de cada classificação é obtido da multiplicação dos coeficientes médios CDC e CE e limitados a valores menores ou iguais a 1.

Tabela 14: Classificação, parâmetros, coeficientes e indicadores Grupo ZUC.

| Classificação | qtd | $\overline{L_p}$<br>[m] | $\overline{L}$<br>[m] | $\overline{V_p}$<br>[bbl] | $\overline{\Delta W}$<br>[hp] | $\overline{\eta_1}$ | $\overline{\eta_2}$ | $\overline{CDC}$ | $\overline{CE}$ | $\overline{IQC}$ |
|---------------|-----|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Excelente     | 31  | 565                     | 646                   | 18                        | 611                           | 0,95                | 1,05                | 0,90             | 1,23            | 1,0              |
| Bom           | 23  | 503                     | 592                   | 156                       | 374                           | 0,65                | 1,00                | 0,66             | 1,24            | 0,82             |
| Médio         | 16  | 526                     | 574                   | 94                        | 389                           | 0,69                | 1,05                | 0,65             | 1,14            | 0,74             |
| Ruim          | 4   | 520                     | 710                   | 253                       | 258                           | 0,33                | 0,95                | 0,35             | 1,06            | 0,37             |
| Péssimo       | 4   | 565                     | 243                   | 269                       | 38                            | 0,16                | 1,02                | 0,15             | 0,42            | 0,06             |

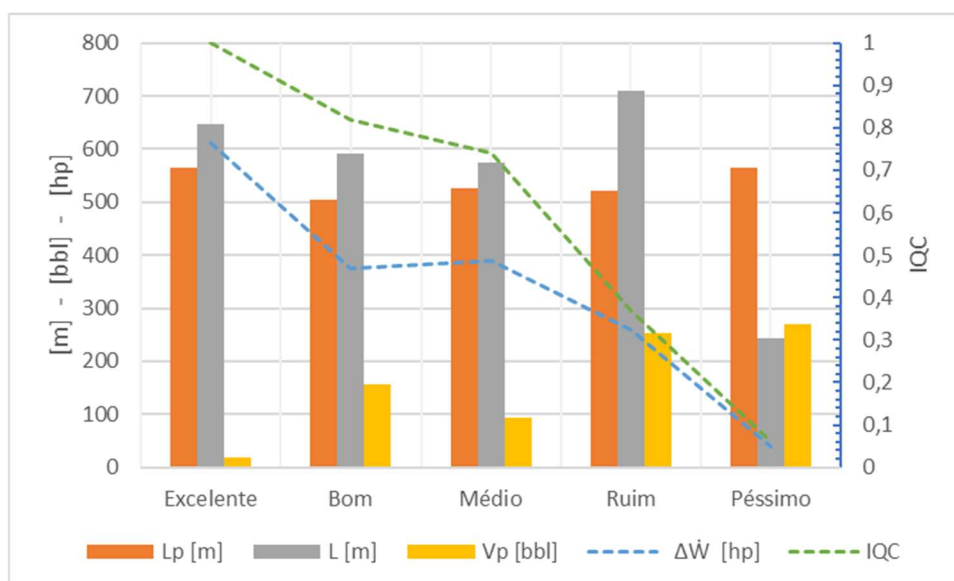


Figura 5.1: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC - ZUC

Na Figura 5.1 é possível verificar o decaimento do IQC à medida que as perdas de volume aumentam. A potência aplicada no deslocamento da pasta é maior quanto maior for o IQC. Pode-se concluir que o indicador é representativo e corresponde aos resultados obtidos na operação de cimentação primária sendo corroborados ao cruzarmos as informações de avaliação dos perfis sônicos resultantes dessas operações, o que confere uma maior consistência e validação ao IQC.

Ao analisarmos o Grupo RAG, verificou-se (Figura 5.2) um decaimento mais acentuado do IQC, havendo uma inversão entre os indicadores para as classificações excelente e bom. Isso se deve ao fato de tratar-se de valores médios e apenas 5 poços foram classificados como bons e sem perdas ante aos 27 poços classificados como excelentes cujas perdas médias foram de 170 [bbl]. Como observado, as perdas médias no segundo grupo foram maiores o que implica valores menores para o IQC (Tabela 15).

Tabela 15: Classificação, parâmetros, coeficientes e indicadores Grupo RAG.

| Classificação | qtd | $\overline{L_p}$<br>[m] | $\overline{L}$<br>[m] | $\overline{V_p}$<br>[bbl] | $\overline{\Delta \dot{W}}$<br>[hp] | $\overline{\eta_1}$ | $\overline{\eta_2}$ | $\overline{CDC}$ | $\overline{CE}$ | $IQC$ |
|---------------|-----|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|-------|
| Excelente     | 27  | 754                     | 860                   | 170                       | 545                                 | 0,64                | 1,06                | 0,54             | 1,11            | 0,74  |
| Bom           | 5   | 706                     | 732                   | 0                         | 743                                 | 1,01                | 1,05                | 0,97             | 1,13            | 1,0   |
| Médio         | 4   | 794                     | 710                   | 220                       | 381                                 | 0,55                | 1,08                | 0,51             | 0,89            | 0,45  |
| Ruim          | 4   | 794                     | 745                   | 400                       | 310                                 | 0,37                | 1,02                | 0,35             | 0,98            | 0,34  |
| Péssimo       | -   | -                       | -                     | -                         | -                                   | -                   | -                   | -                | -               | -     |

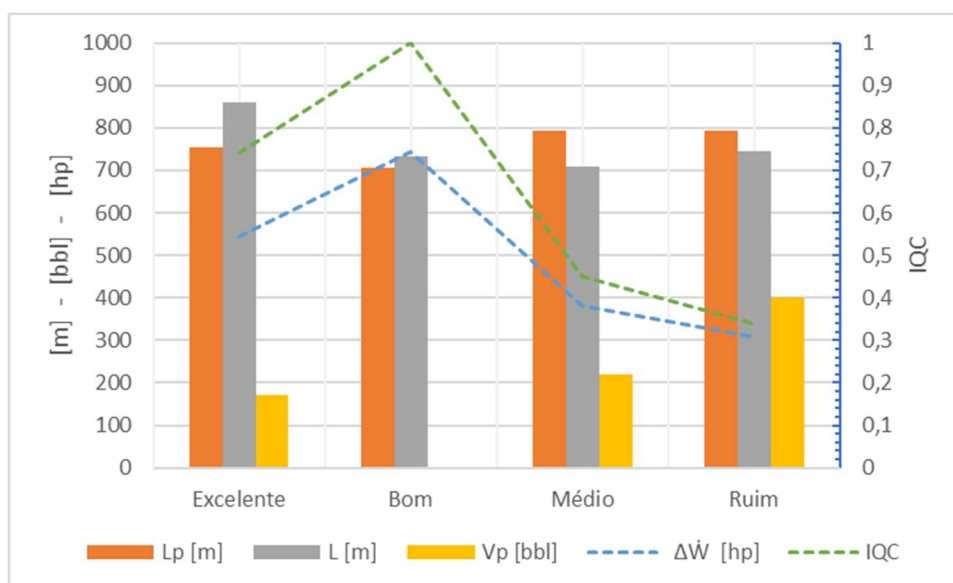


Figura 5.2: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC -RAC

Indicadores abaixo de 0,40 são considerados críticos do ponto de vista operacional, contudo podem ser bem avaliados quanto as análises de perfil sônico em algumas situações. Outra condição que destacamos foram 4 poços do grupo RAG classificados ruins pela análise de perfil sônico e que apresentaram um coeficiente  $\eta_1$  insuficiente. Embora tenham atingido a extensão do isolamento hidráulico necessário, o IQC médio foi de 0,34 considerado abaixo do esperado.

Tabela 16: Classificação, parâmetros, coeficientes e indicadores unificados.

| Classificação | qtd | $\overline{L_p}$<br>[m] | $\overline{L}$<br>[m] | $\overline{V_p}$<br>[bbl] | $\overline{\Delta W}$<br>[hp] | $\overline{\eta_1}$ | $\overline{\eta_2}$ | $\overline{CDC}$ | $\overline{CE}$ | $IQC$ |
|---------------|-----|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|-------|
| Excelente     | 58  | 653                     | 745                   | 89                        | 580                           | 0,81                | 1,06                | 0,76             | 1,24            | 0,94  |
| Bom           | 28  | 670                     | 695                   | 128                       | 433                           | 0,72                | 1,01                | 0,71             | 1,25            | 0,89  |
| Médio         | 20  | 580                     | 601                   | 119                       | 388                           | 0,66                | 1,05                | 0,62             | 1,09            | 0,68  |
| Ruim          | 8   | 657                     | 727                   | 327                       | 284                           | 0,35                | 0,98                | 0,35             | 1,02            | 0,36  |
| Péssimo       | 4   | 565                     | 243                   | 269                       | 38                            | 0,16                | 1,02                | 0,15             | 0,42            | 0,06  |

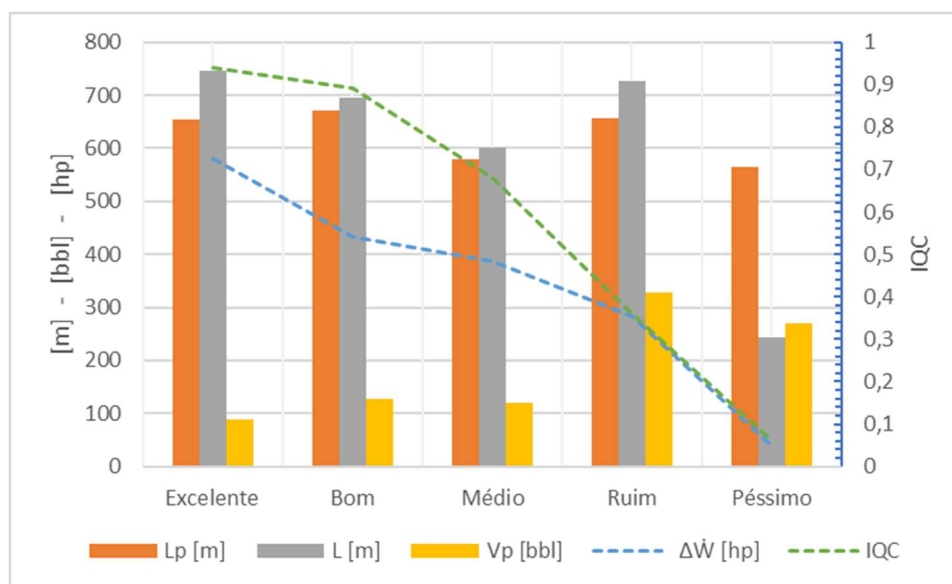


Figura 5.3: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC unificados.

Um exemplo prático da aplicação da metodologia de cálculo do IQC está disponível passo a passo no Apêndice A.

Ao unirmos os dois grupos para uma análise conjunta, o IQC mantém-se consistente e coerente com a classificação dos perfis sônicos, daí podemos inferir para o grupo de poços estudados distribuídos nos campos do pré-sal brasileiro que as operações aceitáveis nos quesitos: isolamento hidráulico; distribuição de cimento; densidade e aderência das interfaces reservatório-cimento e cimento-revestimento, apresentaram o emprego de potências hidráulicas mais elevadas, próximo de 400 [hp] resultando num IQC acima de 0,68. Poços classificados como ruins apresentaram o diferencial de potência abaixo de 300 [hp], acusando IQC inferiores a 0,36.

## 5.2 Análise dos Resultados

Conforme ilustrado nas Figuras 5.4 a 5.13, temos as seguintes análises conforme a classificação dos poços.

### 5.2.1 Classificação e análise dos poços Excelentes

Poços cuja avaliação do perfil sônico foram classificados por “excelentes”, Figura 5.4, apresentaram um excedente de altura de topo de cimento da ordem de 14%, um volume de perdas abaixo de 100 [bbl] por operação atingindo uma diferença de potência hidráulica próximo a 580 [hp], o que, para a extensão obtida, confere um coeficiente operacional de 0,81 [hp/m] e um IQC de 0,94.

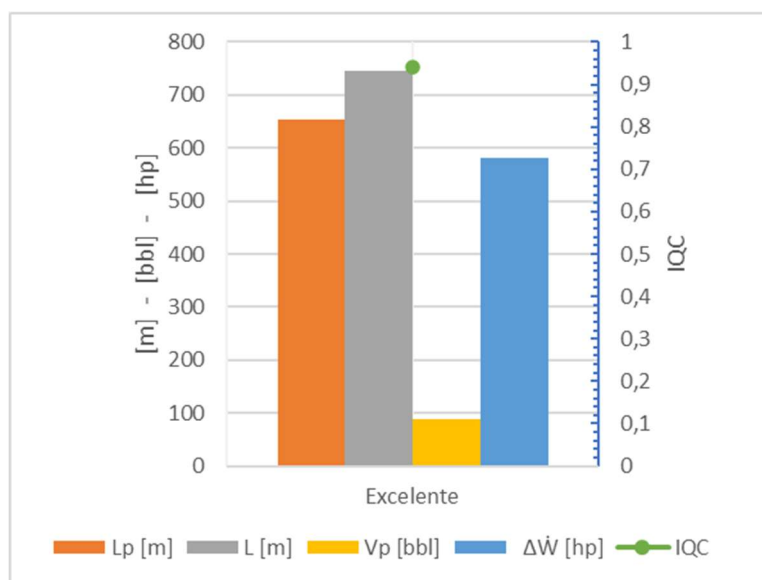


Figura 5.4: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Excelente.

Na figura 5.5 tem-se o posicionamento do IQC para os poços “excelentes” de acordo com o gradiente cromático.

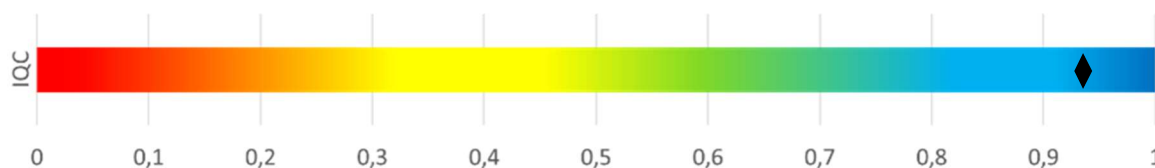


Figura 5.5 Gradiente Cromático – IQC 0,94

### 5.2.2 Classificação e análise dos poços Bons

Poços cuja avaliação do perfil sônico foram classificados por “bom”, Figura 5.5, apesar de apresentarem uma extensão projetada maior, obtiveram um excedente de altura do topo do cimento em torno de 3%. Devido ao volume de perdas em torno de 110 [bbl], o diferencial de potência hidráulica decaiu para valores da ordem de 430 [hp], contudo o IQC de 0,89 não apresentou grande variabilidade pois esse conjunto de poços, apesar do volume de perdas, teve bom desempenho quanto ao topo do cimento planejado. Ao final, o conjunto apresentou um coeficiente operacional de 0,72 [hp/m].

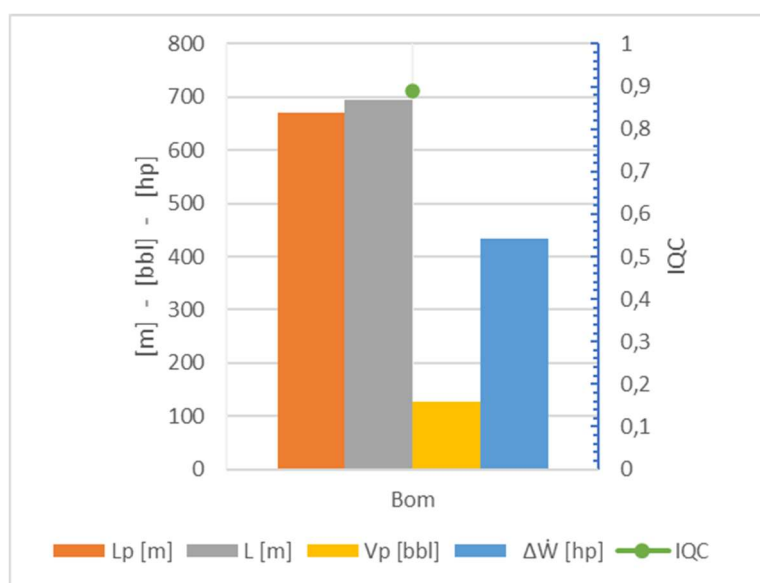


Figura 5.6: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Bom.

Na figura 5.7 tem-se o posicionamento do IQC para os poços “bons” de acordo com o gradiente cromático.

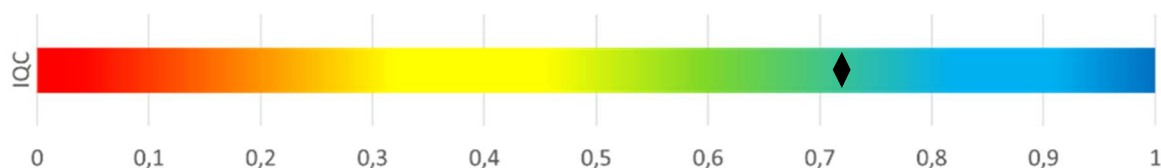


Figura 5.7 Gradiente Cromático – IQC 0,72

### 5.2.3 Classificação e análise dos poços Médios

Poços cuja avaliação do perfil sônico foram classificados por “médio”, Figura 5.3, apresentaram alturas de topo de cimento projetada vs. realizada muito próximas, com excedentes em torno de 3%, porém registraram uma perda de cimento acima de 100 [bbl] resultando num IQC de 0,68 para uma diferença de potência hidráulica de 388 [hp] e conferindo um coeficiente operacional de 0,66 [hp/m].

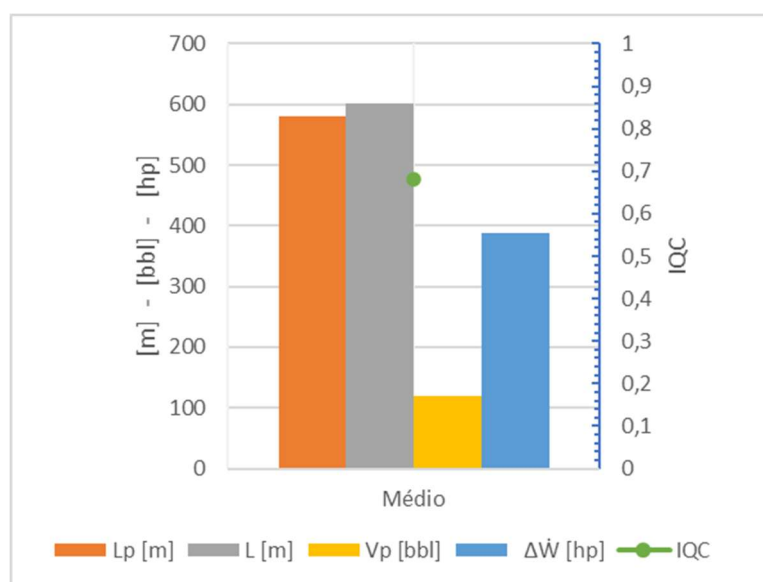


Figura 5.8: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Médios.

Na figura 5.9 tem-se o posicionamento do IQC para os poços “médios” de acordo com o gradiente cromático.

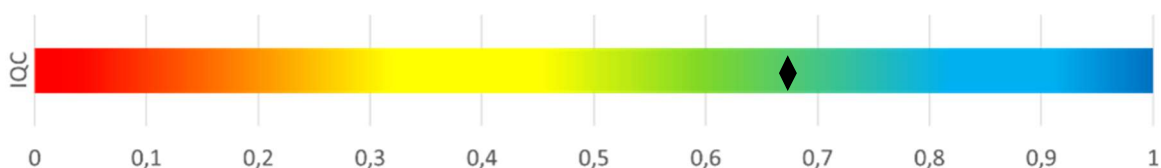


Figura 5.9 Gradiente Cromático – IQC 0,68

#### 5.2.4 Classificação e análise dos poços Ruins

Poços cuja avaliação do perfil sônico foram classificados por “ruim”, Figura 5.7, obtiveram extensões elevada do topo do cimento as custas de grandes perdas de cimento, acima de 300 [bbl], que por sua vez consumiram parte considerável da potência hidráulica disponível, resultando no IQC de 0,36 para um coeficiente operacional de 0,35 [hp/m].

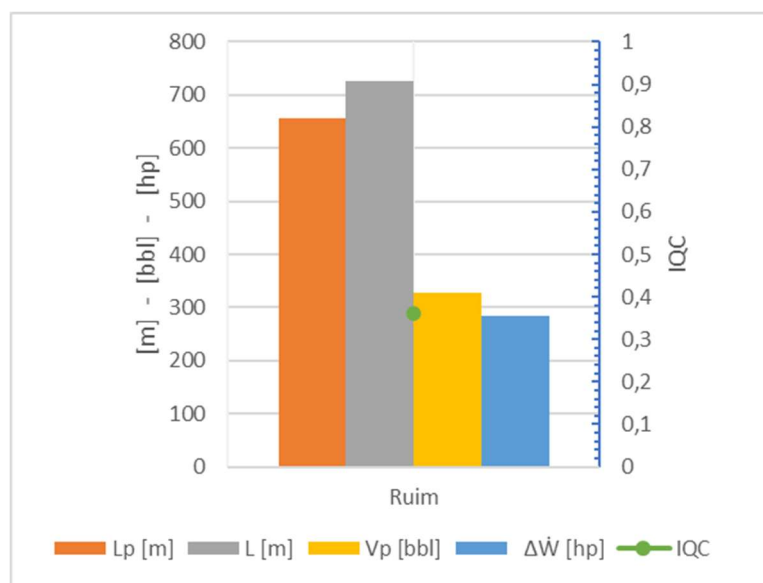


Figura 5.10: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Ruim.

Na figura 5.11 tem-se o posicionamento do IQC para os poços “ruins” de acordo com o gradiente cromático.

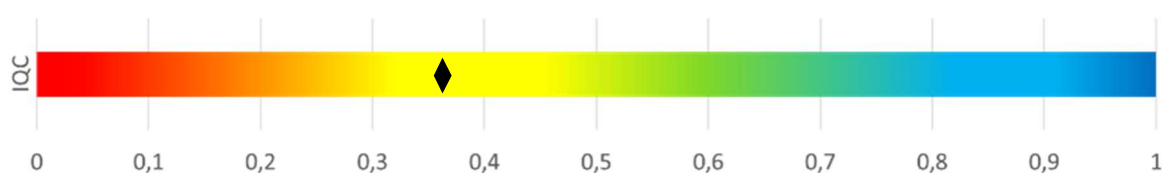


Figura 5.11 Gradiente Cromático – IQC 0,36

#### 5.2.5 Classificação e análise dos poços Péssimos

Poços cuja avaliação do perfil sônico foram classificados por “péssimo”, Figura 5.8, apresentaram pequena extensão do isolamento hidráulico ante a uma extensão pretendida em projeto duas vezes maior. As perdas elevadas de cimento por sua vez tiveram um impacto negativo no desempenho final, em decorrência, apresentaram IQC de 0,06 e um coeficiente operacional de 0,16 [hp/m], aproximadamente quatro vezes menor do que a assinatura para os poços classificados como “médio”.

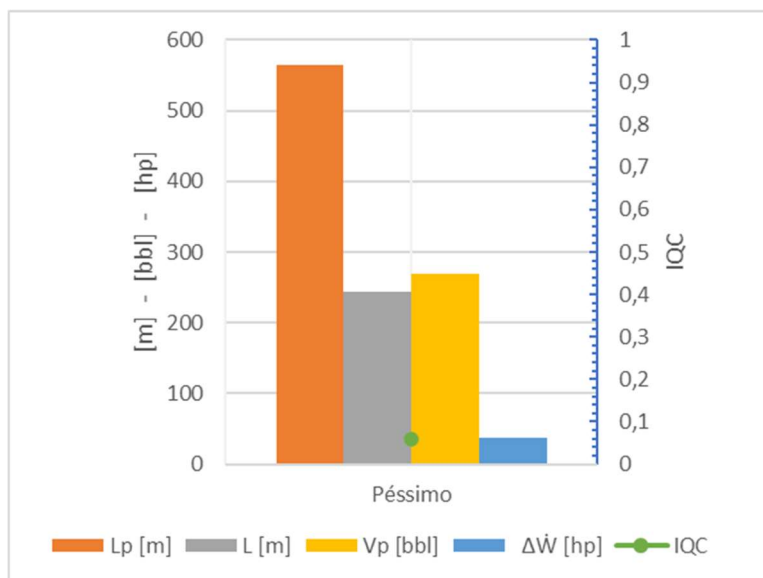


Figura 5.12: Representação gráfica das classificações, parâmetros e IQC – Péssimo.

Na figura 5.13 tem-se o posicionamento do IQC para os poços “péssimos” de acordo com o gradiente cromático.

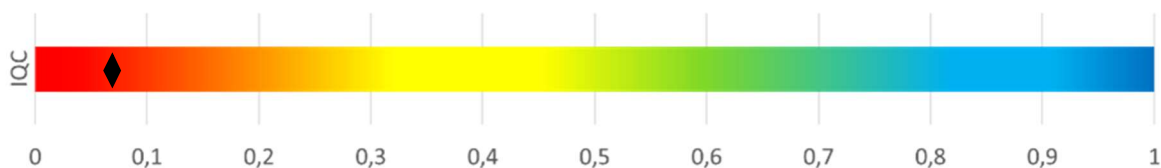


Figura 5.13 Gradiente Cromático – IQC 0,06

A análise constatou que os 58 poços cujo perfil fora avaliado como “excelente” apresentou 21 poços com IQC abaixo de 0,68, contudo por se tratar de valores médios, o grupo obteve um IQC de 0,94. Dentre os 28 poços classificados como “bom”, 8 apresentaram IQC abaixo de 0,68, o IQC deste grupo foi de 0,89. Noutra situação, o grupo de poços classificados por “ruim”, apresentou um poço com valor de IQC de 0,62. Daí pode-se concluir que o conceito de difusividade do IQC para um grupo de poços se deve à prováveis falhas de projeto da cimentação (volume da pasta, volume do anular) combinados aos bons desempenhos operacionais resultarem, excepcionalmente, valores razoáveis para IQCs, cuja avaliação dos perfis sônicos tenha sido negativa, e o inverso também pode ser observado: IQCs muito baixos cuja avaliação dos perfis sônicos tenha sido considerada positiva. Neste caso, um IQC acima de 0,68 é um indicador seguro de que a operação foi bem conduzida e poderá ser confirmada pela análise do perfil sônico eventualmente.

## 6 CONCLUSÃO

A combinação de três fatores críticos são fundamentais para garantir o sucesso ou fracasso de uma operação de cimentação primária: fase de perfuração; ocorrência de perdas e extensão vertical da coluna de cimento. As maiores taxas de insucesso ocorrem na cimentação do revestimento de produção com altas perdas registradas na operação e com extensões verticais projetadas acima de 600 metros de isolamento hidráulico. Esses três fatores estão intrinsecamente associados a potência hidráulica aplicada no deslocamento da pasta de cimento, pois a perda de volume é inerente as características de permeabilidade do reservatório que por sua vez teve seu revestimento de produção cimentado conjuntamente com a rocha capeadora, cuja sapata está, não raramente para os poços do pré-sal, 600 metros acima do fundo do poço.

Tendo em vista os fatores apresentados, evitar a cimentação primária em zona permeável é a primeira orientação que pode ser extraída deste trabalho. As grandes perdas de volume de pasta de cimento observadas em campo foram indubitavelmente registradas durante o monitoramento das perdas de volume de lama na perfuração da fase de produção, o que nos indica que o mesmo irá acontecer com a pasta de cimento com a condição agravada ao bombearmos colchão de remoção do *mud cake*. Para estes casos recomenda-se a inclusão no programa de bombeio dos colchões contendo materiais fibrosos para controle e redução de perdas. A integridade do cimento como elemento de barreira deve ser atestada atentando-se às normas prescritas pelas agências reguladoras do setor que atualmente consideram dentre outras o monitoramento da operação de cimentação primária como prova de boa execução desta pelas prestadoras de serviços e operadoras petrolíferas. Dado o contexto, o monitoramento em tempo real da potência aplicada na operação de deslocamento da pasta de cimento bem como a adoção do Indicador de Qualidade de Cimentação são ferramentas de fundamental importância e estratégicas para a tomada de decisão junto a operadora quanto a um possível retrabalho da cimentação, evitando-se atrasos no cronograma de construção do poço e seus indesejáveis impactos econômicos.

Mediante ao exposto, ao analisarmos o IQC, as perdas e a diferença de potência hidráulica, pode-se concluir que, para o grupo de poços estudados e o histórico apresentado, o desejável após uma cimentação primária seria a obtenção de IQC acima de 0,60, perdas abaixo de 100 [bbl] e um coeficiente operacional acima de 0,66 [hp/m]. Ou seja, em termos práticos, após uma operação de cimentação primária, tendo seus dados operacionais registrados e um

simulador de cimentação calibrado, ao final, obtendo-se as pressões devidamente ajustadas, pode-se calcular o IQC da operação e aferir a qualidade e o sucesso da cimentação mediante gradiente cromático do campo sem a necessidade da corrida dos perfis sônicos.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Para consolidar o estudo apresentado, alguns tópicos relevantes para desenvolvimento futuro são propostos a seguir:

- Elaborar estudos mais aprofundados para o cálculo da pressão dinâmica ante as perdas de carga em regimes de escoamento em fluxo laminar ou turbulento em função das características reológica específicas das principais pastas de cimento, fluidos de perfuração e demais fluidos envolvidos na operação de cimentação primária.
- Expandir o conjunto de dados analisados para outros campos e poços de modo a permitir um comparativo entre os IQCs de cada campo, definindo-se assim um indicador médio padrão para cada campo de acordo com suas especificidades.
- Comparar e correlacionar as informações extraídas dos perfis sônicos e sua correspondência direta com os critérios de avaliação. Um maior detalhamento desses critérios contribuirá significativamente para refinamento técnico e teórico conferindo maior robustez ao IQC.
- Em futuras aplicações dessa metodologia, o gradiente cromático deverá ser personalizado e constantemente aprimorado, sendo tão mais preciso quanto maior a quantidade de registro de novas entradas de poços e atualizações do histórico de IQCs obtidos dos poços já perfurados de determinado campo. O gradiente cromático padrão servirá como referência para a cimentação primária dos poços futuros deste mesmo campo ou campos correlatos.
- Outras aplicações para o IQC poderão ser feitas ao se analisar a extensão cimentada sobreposta entre o revestimento intermediário e o revestimento de produção, pois devido a erosão ao perfurar a sapata cimentada do revestimento intermediário bem como a redução do diâmetro da broca de perfuração da fase de produção, essa região (*hot spot*) ocasiona perturbações no regime de escoamento implicando na qualidade desta cimentação primária.

## REFERÊNCIAS

ANP 46/2016. **"Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento da Integridade de Poços SGIP"**. RESOLUÇÃO ANP Nº 46, DE 1º.11.2016 DOU 3.11.2016 – RETIFICADO DOU 7.11.2016

<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2016/novembro&item=ranp-46--2016>.

ALAWAD, M. N. J.; MOHAMMAD, H. A. Engineering Management and Inspection Schedule of Petroleum Well Integrity King Saud University , College of Engineering , King Abdulaziz City for Science and Technology ,. **Journal of Emerging trends in engineering and Applied Sciences**, v. 7, n. 3, p. 109–117, 2016.

ALKINANI, H. H. et al. **State-of-the-Art Review of Lost Circulation Materials and Treatments** — Part I: General Trends and Uses. 2019.

ALSABA, M.; NYGAARD, R. Review of Lost Circulation Materials and Treatments with an Updated Classification. **AADE Fluids Technical Conference and Exhibition**, August, p. 1–9, 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Isolating Potential Flow Zones During Well Construction** - API Standard 65 Part 2. December, p. 1–96, 2010.

BEIRUTE, R. M. The phenomenon of free fall during primary cementing. **Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, September, 1984.

BEIRUTE, R. M. On-site diagnosis of cement job problems: the concept of job signatures. **SPE drilling engineering**, v. 3, n. 4, p. 374–380, 1988.

BENNETT, T. **Well Cement Integrity and Cementing Practices**. p. 54, 2016.

BOURGOYNE, A.; MILLHEIM, K.; CHENEVERT, M. **Applied Drilling Engineering**. 1984.

BRECHAN, B.; SANGESLAND, S.; NAADEN, C. Well integrity - Next developments. **Proceedings of the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition**, v. 2018- January, 2018.

BRICE, J. W.; HOLMES, B. C. Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques. **Journal of Petroleum Technology**, v. 16, n. 05, p. 503–508, 1964.

BURDYLO, L.; BIRCH, G. **Primary Cementing Techniques**. Elsevier, 1st ed., v. 28. p.12-27, 1990.

CONTRERAS, J. et al. Real-Time monitoring & diagnoses on deepwater cement barrier Placement: Case studies from the Gulf of Mexico & Atlantic Canada. **Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference**, v. 6, p. 4302–4312, 2017.

DACCORD, G.; BARET, J. F. How fluid loss influences primary cementing: Literature review and methodology. **Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference**, v. 1992-May, p. 757–764, 1992.

DA FONSECA, T. C. **Metodologia de Análise de Integridade para Projetos de Poços de Desenvolvimento da Produção**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, pp. 67, 2012.

DEBRUIJN, G. G. et al. Improved oversight increases service quality for deepwater cementing operations. **Society of Petroleum Engineers - SPE Deepwater Drilling and Completions Conference 2012**, p. 310–315, 2012.

DOOPLY, M. et al. Understanding real-time job signatures on deepwater cementing jobs with dynamic losses. **Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, September, 2019.

FILHO, R. G. DA S. **Pastas de Cimento para Aplicação em Poços de Petróleo com Zonas Fraturadas**. Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. p. 105, 2018.

FOX, R.W., McDONALD, A.T., PRITCHARD, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, LTC, 8ª ed., p. 1018, 2010.

FREDRICH, J. T. et al. **Stress Perturbations Adjacent to Salt Bodies in the Deepwater Gulf of Mexico**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 4 abr. 2003. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/84554-MS>>

FREITAS, R. et al. Novel Solution for Cementing Operations in Scenarios of Losses and Improving Cement Bonding Results in the Brazilian Deepwater Pre-Salt. 2019.

GOMES, P. J.; JAMES, M.; THEROND, E. **Systematic Use of Real Time Data Analysis for Primary Cementing and Cement Job Verification**. Offshore Technology Conference. 1 maio 2017. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.4043/27557-MS>>

GRADISHAR, J.; GROESBECK, B. M. Elimination of errors in cement displacement volumes and plug bump-plug indicator system. **SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings**, v. 1, p. 530–536, 2010.

GREGATTI, A. et al. Cementing in front of saline zone and carbonate reservoir with presence of CO<sub>2</sub>. **OTC Brasil 2015: The Atlantic: From East to West - An Ocean of Innovation**, p. 2179–2193, 2015.

HAUT, R. C.; CROOK, R. J. Primary Cementing: the Mud Displacement Process. **Audio Engineering Society Preprint**, 1979.

HOWARD, G. C.; SCOTT, P. P. An Analysis and the Control of Lost Circulation. **Journal of Petroleum Technology**, v. 3, n. 06, p. 171–182, 1951.

IZON, D.; DANENBERGER, E.; MAYES, M. Absence of fatalities in blowouts encouraging in MMS study of OCS incidents 1992-2006. **Drilling contractor**, v. 63, n. 4, 2007.

JACULLI, M.A., COLOMBO, D., MENDES, J. R. P., MARCULINO, C. F. G. and COSTA, B. G. S., 2019. “Operational Safety Risk Assessment in Offshore Oil Wells”. **Proceedings of the**

**ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2019)**, 9 14 June, Glasgow, Scotland. DOI: 10.1115/OMAE2019-95069.

KHALIFEH, M.; SAASEN, A. **Introduction to Permanent Plug and Abandonment of Wells**. Cham: Springer International Publishing, v.12, 2020.

KIRAN, R. et al. Identification and evaluation of well integrity and causes of failure of well integrity barriers (A review). **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 45, p. 511–526, 2017.

LAPEYROUSE, N. J.; LYONS, W. C.; CARTER, T. **Formulas and Calculations for Drilling, Production, and Workover**. Elsevier, 2<sup>nd</sup> ed., p. 224, 2012.

LIMA, H. R. P. **Fundamentos de Perfuração**, Petrobras, Serec, Cen-Nor, Salvador, 1992.

LIMA, L.B. **Análise da qualidade da cimentação de poços de petróleo offshore utilizando técnicas de mineração de dados**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, UFRJ, 2018.

MIRANDA, C. R. et al. Materials for controlling severe lost circulation - Laboratory evaluation. **SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings**, LCM, p. 1–13, 2017.

MITCHELL, F. M., MISKA, S.Z. **Fundamentals of Drilling Engineering**. Society of Petroleum Engineers. 2011.

MIURA, K., MOROOKA, C. K., MENDES, J. R. P. and GUILHERME, I. R., 2006. “Characterization of operational safety in offshore oil wells”. **Journal of Petroleum Science and Engineering** Vol. 51 p. 111 –126, Elsevier.

MIURA, K; GARICA, J. E. L. **Manual da Completação Petrobras**, E&P-BC, Macaé, RJ, 1988.

NELSON, ERIK B. GUILLOT, D. **Well Cementing**. 2nd. ed., Sugar Land, Texas 77478, pp. 751, 2006.

PAULA, J. L.; GARCIA, J. E. L.; CALDAS, P. **Equipamentos de Superfície**, Petrobras, Serec, Cen-Nor, Salvador, 1989.

PIOT, B. M.; LOIZZO, M. Reviving the Job Signature concept for better quality cement jobs. **Proceedings of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, APDT**, p. 505–513, 1998.

RAVI, K. M.; BEIRUTE, R. M.; COVINGTON, R. L. Improve primary cementing by continuous monitoring of circulatable hole. **Proceedings of the Permian Basin Oil & Gas Recovery Conference**, p. 155–170, 1994.

SEYMOUR, K. P. et al. Drilling close to salt diapirs in the north sea. **Offshore Europe 93**, p. 193–204, 1993.

SHADRAVAN, A.; AMANI, M. A decade of self-sealing cement technology application to ensure long-term well integrity. **Society of Petroleum Engineers - SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference**, 2009, p. 1–7, 2015.

SMITH, D. K. **Cementing**. SPE Monograph Series, Vol 4, pp.249, 1987.

SMITH, R. C. Improved Cementing Success Through Real-Time Job Monitoring. **JPT, Journal of Petroleum Technology**, v. 38, n. 7, p. 619–620, 1986.

THOMAS, J.E., **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, editora. Interciência, 2<sup>a</sup> edição, Rio de janeiro, pp. 271, 2001.

TEOH, M. et al. Managed pressure cementing MPC within a narrow pressure window, deepwater Gulf of Mexico application. **Society of Petroleum Engineers - IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition MPDU**, 2019.

TORRES, J. L. et al. Real-time monitoring enables control and evaluation of cementing operations. **Society of Petroleum Engineers - SPE Latin America and Caribbean Mature**

**Fields Symposium**, 2017.

VICENTE, R. **Avaliação da Cimentação**, Petrobrás, Serec, Cen-Nor, Salvador, 1992.

XU, R.; WOJTANOWICZ, A. K. Diagnosis of Sustained Casing Pressure from Bleed-off/Buildup Testing Patterns. **Proceedings - SPE Production Operations Symposium**, p. 119–133, 2001.

XUE, L. et al. A safety barrier-based accident model for offshore drilling blowouts. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 26, n. 1, p. 164–171, 2013.

WILSON, A. Managed-Pressure Cementing: Successful Deepwater Application. **Journal of Petroleum Technology**, v. 70, n. 05, p. 81–83, 2018.

## **APÊNDICE A - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA – EXEMPLO DE CÁLCULO**

Como exemplo prático da aplicação dos cálculos para a obtenção da potência hidráulica e do IQC, consideremos um poço com as seguintes características e parâmetros operacionais:

- Profundidade vertical total: 5600 [m];
- Profundidade vertical total do topo do cimento: 5050 [m];
- Profundidade vertical do topo do cimento projetado: 5000 [m];
- Volume total do cimento e densidade: 160 bbl – 16,0 [lbm/gal];
- Volume do colchão de lavagem e densidade: 60 bbl – 9,9 [lbm/gal];
- Volume do colchão espaçador e densidade: 30 bbl – 8,9 [lbm/gal];
- Volume da lama de perfuração e densidade: 835 bbl – 10,9 [lbm/gal];
- Volume de perdas do cimento: 60 [bbl];
- Vazão do cimento: 13 [bbl/min];
- Capacidade volumetrica do anular: 0,183 [bbl/m].

As etapas de cálculo consistem em obter-se a pressão hidrostática, a pressão dinâmica e, então, a pressão total no fundo do poço e no topo do cimento. A pressão hidrostática é a somatória das pressões hidrostáticas dos fluidos ao longo do anular. A pressão dinâmica é oriunda de forças viscosas ao longo do deslocamento do fluido, aqui considerado não-newtoniano.

Os cálculos efetuados para o grupo de poços estudados apresentou uma perda de pressão média por atrito da pasta de cimento da ordem de 0,35 [psi] para cada metro vertical de deslocamento da pasta, e uma perda média de pressão por atrito da lama de perfuração de 0,10 [psi] para cada metro vertical deslocado. Esses valores médios serão adotados para simplificar o demonstrativo de cálculo.

Uma vez obtida a pressão total nas duas profundidades, deve-se calcular a vazão no topo do cimento decontando-se a vazão de perda. A vazão de fundo é, para todos os fins, a vazão da bomba de superfície. Importante considerar a potência hidráulica dissipada com a perda de fluido para a formação e distinguir a potência hidráulica útil no topo do cimento, essas serão obtidas na sequência dos cálculos.

### Pressão Total no Anular – Hidrostática e Dinâmica

Um poço e seu anular configuram um vaso comunicante em U, deste modo, durante a circulação e elevação do cimento, todo trabalho realizado pela unidade de cimentação e pela força gravitacional deverá transpor as resistências de forças de atrito do fluido no anular bem como a pressão hidrostática do anular preenchido pela pasta de cimento e demais fluidos acima composto principalmente pela lama de perfuração. Assim, para o fundo do poço, antes da batida de plug no colar flutuante, temos que a pressão total é dada pela equação abaixo:

$$P_b + P_{hc} - \Delta P_C = P_r + P_{hA} + \Delta P_A$$

Onde temos em psi:

$P_b$  : pressão da bomba de deslocamento positivo;

$P_{hc}$  : pressão hidrostática na coluna na profundidade;

$\Delta P_C$  : perda de carga na coluna;

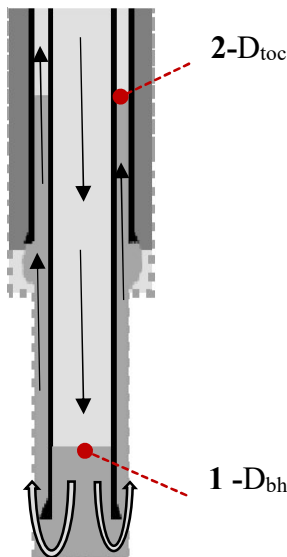
$P_r$  : pressão na linha de retorno (choke manifold);

$P_{hA}$  : pressão hidrostática no anular na profundidade;

$\Delta P_A$  : perda de carga no anular;

$D_{toc}$ : profundidade real de topo do cimento poço;

$D_{bh}$  : profundidade real de fundo do cimento poço.



Para o cálculo da pressão total no fundo do poço e topo do cimento temos:

$$P_{bh} = P_{h1} + \Delta P_c + \Delta P_l$$

$$P_{toc} = P_{h2} + \Delta P_l$$

Onde:

$P_{bh}$ : pressão total no fundo poço;

$P_{h1}$ : pressão hidrostática do anular no fundo de poço;

$\Delta P_c$ : perda de carga do cimento no anular;

$\Delta P_l$ : perda de carga da lama no anular;

$P_{toc}$ : pressão total no topo do cimento;

$P_{h2}$ : pressão hidrostática do anular no topo do cimento.

$$P_h = \sum_{i=1}^n 0,17 \frac{V_i \rho_i}{Cap_a}$$

$P_h$ : pressão hidrostática a determinada profundidade, [psi];

$n$ : quantidade de fluidos que compõem o programa de bombeamento;

$V_i$ : corresponde ao volume total do fluido  $i$  bombeado, [bbl];

$Cap_a$ : volume específico para preenchimento do anular na extensão de um metro, aqui adotado em 0,183 [bbl/m];

$\rho_i$ : densidade do fluido em [lbm/gal];

Substituindo as variáveis temos:

$$\begin{aligned} P_{bh} &= \frac{0,17}{0,183} [(100 \times 16,0 + 60 \times 9,9 + 835 \times 10,9) + (0,35 + 0,10) \times 550] \\ &= 10.447 \text{ psi} \end{aligned}$$

Para o topo do cimento, nas mesmas condições, temos:

$$P_{toc} = \frac{0,17}{0,183} [(60 \times 9,9 + 835 \times 10,9) + (0,10 \times 550)] = 9.061 \text{ psi}$$

### **Vazão Efetiva no Topo do Cimento e Vazão de Deslocamento da Bomba**

A vazão efetiva do topo do cimento é a vazão da bomba descontado a vazão de perda, assim temos:

$$Q_e = Q_b - \frac{V_p}{\left(\frac{V_t}{Q_b}\right)}$$

Onde:

$Q_p$ : vazão de perda de cimento, [bbl/min];

$Q_e$ : vazão efetiva no topo do cimento, [bbl/min];

$Q_b$ : vazão da unidade de cimentação, [bbl/min];

$V_t$ : volume total de cimento bombeado, [bbl];

$V_p$ : volume de perda de cimento, [bbl];

$t_b$ : tempo total de bombeamento do cimento em min.

Substituindo temos:

$$Q_e = 13,0 - \frac{60}{\left(\frac{160}{13,0}\right)} = 8,1 \text{ bbl/min}$$

### Potência Hidráulica Total e Coeficientes de Rendimento

A potência hidráulica obtida através de um fluxo pode ser calculada pelo produto:

$$\dot{W}_h = Q_v \times P$$

Onde:

$\dot{W}_h$ : potência hidráulica;

$Q_v$ : vazão volumétrica;

$P$ : pressão.

Tendo as vazões e pressões determinadas, o produto nos retorna a potência hidráulica nas profundidades em análise visto que para o fundo do poço a vazão considerada é a vazão de bomba e para o topo do cimento a vazão considerada é a vazão efetiva, ou seja, descontada das perdas de volume. Temos então na Equação 10:

$$\dot{W}_{bh} = Q_b P_{bh} 0,0243$$

Substituindo temos:

$$\dot{W}_{bh} = 13,0 \times 10.447 \times 0,0243 = 3.300 \text{ hp}$$

De acordo com a lei da conservação da massa e da energia, uma parte dessa energia foi dispendida ao deslocar o volume de pasta de cimento absorvida pelo reservatório. Assim

podemos concluir que uma certa potência foi dissipada junto ao volume de perdas por infiltração no reservatório que não ultrapassou a extensão total da coluna de cimento.

Para a potência hidráulica no topo do cimento temos a Equação 11:

$$\dot{W}_{toc} = \dot{W}_u + \dot{W}_d$$

Onde para a potência útil  $\dot{W}_u$  temos:

$$\dot{W}_u = Q_e (p_{h2} + \Delta p_l) 0,0243$$

E para a potência dissipada  $\dot{W}_d$ :

$$\dot{W}_d = Q_p (p_{h2} + \Delta p_l) 0,0243$$

$$\dot{W}_{toc} = Q_b (p_{h2} + \Delta p_l) 0,0243$$

Onde  $\dot{W}_{toc}$  é a potência hidráulica total teórica no topo do cimento em hp.

Da relação entre a potência útil e a potência total teórica podemos extrair o rendimento  $\eta'$  conforme coeficiente abaixo:

$$\eta' = \frac{\dot{W}_u}{\dot{W}_{toc}}$$

Em decorrência, entre o fundo do poço e o topo do cimento, obtém-se o diferencial de potência  $\Delta \dot{W}$  empregado no deslocamento e da pasta de cimento conforme a equação 26:

$$\Delta \dot{W} = (\dot{W}_{bh} - \dot{W}_{toc}) \eta'$$

Quando não houver perdas de volume, a vazão de fundo e topo do cimento são as mesmas, neste caso o coeficiente de rendimento  $\eta'$  será igual a 1.

Para o topo do cimento temos:

$$\dot{W}_{toc} = 13,0 \times 9.061 \times 0,0243 = 2.862 \text{ hp}$$

$$\dot{W}_u = 8,1 \times 9.061 \times 0,0243 = 1.783 \text{ hp}$$

$$\eta' = \frac{1.783}{2.862} = 0,62$$

$$\Delta \dot{W} = (3.300 - 2.862) \times 0,62 = 271,6 \text{ hp}$$

### Indicador de Qualidade da Cimentação IQC

Vimos que a sequência de fluidos bombeados na operação varia e projeto a projeto, assim, cada poço apresentará suas respectivas potências hidráulicas dado sua programação de bombeio e ocorrências ou não de perdas. Por conseguinte, seria irrazoável compararmos diferentes projetos de cimentação primária e operações distintas em valores absolutos de potências hidráulicas, contudo é possível extrairmos alguns coeficientes de rendimento a fim de possibilitar, em certo grau, a comparabilidade entre as operações como proposto na metodologia abaixo.

$$\eta_1 = \frac{\Delta \dot{W}}{L}$$

O coeficiente  $\eta_1$  em hp/m representa um parâmetro qualitativo que expressa o quanto de potência foi aplicada por metro de coluna de cimento obtida ( $L$ ) ao término da operação e que pode ser comparado a um coeficiente padrão  $\eta_2$  em hp/m esperado para cada operação, conforme equação que considera a densidade do cimento e a densidade equivalente das perdas por atrito para uma extensão de 1 metro, vide Equação 20:

$$\eta_2 = 4,13 \cdot 10^{-3} Q_b \left[ \rho_c + \left( \frac{\Delta P_c + \Delta P_t}{0,17L} \right) \right]$$

Dos rendimentos acima podemos obter o Coeficiente de Desempenho do Cimento -CDC - conforme Equação 21 abaixo:

$$CDC = \frac{\eta_1}{\eta_2}$$

O atingimento do topo do cimento na altura projetada é fator crucial para a avaliação da operação de cimentação, embora este não seja o único fator relevante uma vez que a avaliação do isolamento considera diferentes critérios para análise conforme veremos a seguir na Tabela 11, propõem-se aqui um Coeficiente de Extensão - CE - da coluna de cimento obtido pela divisão entre a extensão real ( $L$ ) pela extensão projetada ( $L_p$ ) conforme Equação 22 abaixo:

$$CE = \frac{L}{L_p}$$

Substituindo nas equações temos:

$$\eta_1 = \frac{271,6}{550} = 0,49 \text{ hp/m}$$

$$\eta_2 = 4,13 \cdot 10^{-3} \times 13,0 \left[ 16,0 + \left( \frac{0,45}{0,17} \right) \right] = 1,0 \text{ hp/m}$$

Daí temos:

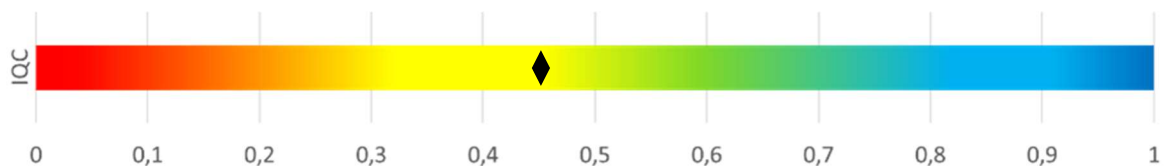
$$CDC = \frac{0,49}{1,0} = 0,49$$

$$CE = \frac{550}{600} = 0,92$$

Assim, para o IQC temos:

$$IQC = CDC \times CE = 0,49 \times 0,92 = \mathbf{0,45}$$

Neste caso, supondo que o poço esteja contido no grupo amostral estudado e, de acordo com a escala cromática deste grupo, podemos dizer que a qualidade da cimentação é mediana e aceitável, porém é recomendável um tratamento de redução de perdas para os próximos poços cujas características sejam semelhantes.



## APÊNDICE B – PARÂMETROS OPERACIONAIS E INFORMAÇÕES DE PROJETO DO POÇO.

| Nome                                       | Unidade    | Parâmetro          | Descrição                                                            |
|--------------------------------------------|------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Poço                                       | n/a        | Projeto            | Campo, número, tipo                                                  |
| Revestimento                               | polegadas  | Projeto            | 10-3/4 x 9-5/8                                                       |
| Profundidade Final da Fase                 | metros     | Projeto e Operação | Profundidade vertical verdadeira                                     |
| Profundidade do Topo do Cimento            | metros     | Operação           | Profundidade vertical verdadeira                                     |
| Profundidade do Topo do Cimento Previsto   | metros     | Projeto            | Profundidade vertical verdadeira                                     |
| Excesso de Cimento                         | percentual | Projeto            | Adicional sob o volume de pasta                                      |
| Extensão do Cimento                        | metros     | Operação           | Obtido através do perfil sônico                                      |
| Extensão do Cimento Previsto               | metros     | Projeto            | Dado de projeto                                                      |
| Densidade do Cimento                       | lbm/gal    | Projeto e Operação | A densidade da pasta é dado de projeto e medido ao longo da operação |
| Pressão Hidrostática do Cimento no Anular  | psi        | Projeto e Operação | Calculado                                                            |
| Densidade Fluido no Anular do Poço         | lbm/gal    | Projeto e Operação | Normalmente o fluido de perfuração de perfuração da fase             |
| Volume do Anular                           | bbl/m      | Projeto e Operação | O volume do anular não considera o caliper e possíveis arrombamentos |
| Volume do Fluido de Perfuração             | bbl        | Projeto e Operação | Obtido através da capacidade do anular e profundidades               |
| Pressão Hidráulica do Fluido de Perfuração | psi        | Projeto e Operação | Calculado                                                            |
| Volume do Colchão Lavador                  | bbl        | Projeto e Operação | Conforme dados de campo                                              |
| Pressão Hidráulica do Colchão Lavador      | psi        | Projeto e Operação | Calculado                                                            |
| Volume do Colchão Espaçador                | bbl        | Projeto e Operação | Extraído de operações semelhantes                                    |
| Pressão Hidrostática do Colchão Espaçador  | psi        | Projeto e Operação | Calculado                                                            |
| Pressão Hidráulica Anular                  | psi        | Projeto e Operação | Calculado                                                            |
| Pressão Hidráulica na Coluna               | psi        | Projeto e Operação | Calculado                                                            |
| Vazão de Deslocamento                      | bbl/min    | Projeto e Operação | Dados de campo                                                       |
| Vazão de Perda                             | bbl/min    | Operação           | Calculado                                                            |

| <b>Nome</b>                                       | <b>Unidade</b> | <b>Parâmetro</b> | <b>Descrição</b> |
|---------------------------------------------------|----------------|------------------|------------------|
| Vazão Efetiva                                     | bbl/min        | Operação         | Calculado        |
| Potência Hidráulica no Fundo do Poço              | hp             | Operação         | Calculado        |
| Potência Hidráulica Topo do Cimento               | hp             | Operação         | Calculado        |
| Diferença de Potência Hidráulica Realizado        | m/hp           | Operação         | Calculado        |
| Diferença de Potência Hidráulica do Sistema       | m/hp           | Projeto          | Calculado        |
| Coefficiente de Desempenho da Potência Hidráulica | percentual     | Operação         | Calculado        |
| Coefficiente de Desempenho Extensão do Cimento    | percentual     | Operação         | Calculado        |
| Indicador de Qualidade da Operação de Cimentação  | adimensional   | Operação         | Calculado        |

## APÊNDICE C – TABELAS DE DADOS DOS POÇOS E CÁLCULOS

### B.1 Poços Campo Zeus

| Poço  | $D_{bh}$<br>[m] | $D_{toc}$<br>[m] | $L$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\rho$<br>[lbm/gal] | $V_t$<br>[bbl] | $V_p$<br>[bbl] | $P_c$<br>[psi] |
|-------|-----------------|------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| 2Z-01 | 5063            | 4463             | 600        | 603          | 16,2                | 110            | 0              | 1652           |
| 2Z-02 | 5424            | 4724             | 700        | 897          | 15,0                | 128            | 0              | 1785           |
| 2Z-03 | 5424            | 4724             | 700        | 724          | 16,0                | 128            | 0              | 1904           |
| 2Z-04 | 5231            | 4931             | 300        | 374          | 15,8                | 58             | 280            | 806            |
| 2Z-05 | 4920            | 4525             | 395        | 546          | 15,8                | 72             | 0              | 1060           |
| 2Z-06 | 4897            | 4497             | 400        | 347          | 15,8                | 73             | 0              | 1074           |
| 2Z-07 | 5373            | 4336             | 1037       | 677          | 15,8                | 190            | 0              | 2785           |
| 2Z-08 | 5414            | 4421             | 993        | 732          | 16,2                | 192            | 391            | 2735           |
| 2Z-09 | 5506            | 4870             | 636        | 387          | 16,2                | 116            | 300            | 1752           |
| 2Z-10 | 5057            | 4450             | 607        | 637          | 15,8                | 111            | 0              | 1630           |
| 2Z-11 | 5240            | 4580             | 660        | 566          | 15,8                | 121            | 0              | 1772           |
| 2Z-12 | 4870            | 4515             | 355        | 445          | 15,8                | 65             | 0              | 953            |
| 2Z-13 | 5292            | 4621             | 671        | 460          | 15,8                | 123            | 0              | 1802           |
| 2Z-14 | 5252            | 4825             | 427        | 572          | 16,0                | 78             | 22             | 1161           |
| 2Z-15 | 5276            | 4888             | 388        | 588          | 15,6                | 71             | 203            | 1028           |
| 2Z-16 | 5344            | 4836             | 509        | 362          | 15,8                | 93             | 0              | 1367           |
| 2Z-17 | 5276            | 4641             | 635        | 643          | 15,8                | 116            | 150            | 1705           |
| 2Z-18 | 5288            | 4608             | 680        | 710          | 15,8                | 124            | 135            | 1826           |
| 2Z-19 | 5275            | 4675             | 600        | 564          | 15,8                | 110            | 0              | 1612           |
| 2Z-20 | 5270            | 4590             | 680        | 609          | 16,0                | 124            | 434            | 1850           |
| 2Z-21 | 5267            | 4567             | 700        | 781          | 16,2                | 128            | 0              | 1928           |
| 2Z-22 | 5205            | 4605             | 600        | 705          | 15,0                | 110            | 0              | 1530           |
| 2Z-23 | 5140            | 4966             | 175        | 433          | 16,2                | 34             | 140            | 481            |
| 2Z-24 | 5015            | 4270             | 745        | 521          | 16,2                | 136            | 0              | 2052           |
| 2Z-25 | 5275            | 4300             | 975        | 489          | 16,2                | 178            | 0              | 2685           |
| 2Z-26 | 5072            | 4412             | 660        | 486          | 16,2                | 121            | 0              | 1818           |
| 2Z-27 | 5318            | 4223             | 1095       | 765          | 15,8                | 200            | 0              | 2942           |
| 2Z-28 | 5199            | 4606             | 593        | 499          | 16,0                | 108            | 0              | 1612           |
| 2Z-29 | 5346            | 5071             | 275        | 626          | 16,2                | 53             | 200            | 756            |
| 2Z-30 | 5303            | 4582             | 721        | 556          | 15,6                | 132            | 209            | 1912           |
| 2Z-31 | 5174            | 4400             | 774        | 625          | 15,8                | 142            | 200            | 2078           |
| 2Z-32 | 5359            | 4679             | 680        | 745          | 15,8                | 124            | 156            | 1826           |
| 2Z-33 | 5145            | 4813             | 332        | 580          | 15,8                | 61             | 60             | 891            |
| 2Z-34 | 5214            | 4614             | 600        | 534          | 15,8                | 110            | 0              | 1612           |
| 2Z-35 | 5037            | 4592             | 445        | 240          | 15,8                | 81             | 0              | 1194           |
| 2Z-36 | 5290            | 4690             | 600        | 580          | 15,8                | 110            | 0              | 1612           |
| 2Z-37 | 5070            | 4310             | 760        | 480          | 15,8                | 139            | 0              | 2041           |
| 2Z-38 | 5277            | 4531             | 746        | 681          | 16,2                | 136            | 190            | 2054           |

| Poço  | $D_{bh}$<br>[m] | $D_{toc}$<br>[m] | $L$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\rho$<br>[lbm/gal] | $V_t$<br>[bbl] | $V_p$<br>[bbl] | $P_c$<br>[psi] |
|-------|-----------------|------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| 2Z-39 | 5243            | 4472             | 771        | 650          | 16,2                | 141            | 153            | 2123           |
| 2Z-40 | 5070            | 4450             | 620        | 493          | 16,0                | 113            | 0              | 1686           |
| 2Z-41 | 5288            | 4608             | 680        | 723          | 15,6                | 124            | 189            | 1803           |
| 2Z-42 | 5247            | 4631             | 616        | 311          | 15,8                | 113            | 86             | 1654           |
| 2Z-43 | 5143            | 4990             | 153        | 567          | 15,8                | 29             | 251            | 410            |
| 2Z-44 | 5120            | 4459             | 661        | 364          | 15,8                | 121            | 0              | 1776           |
| 2Z-45 | 5247            | 4204             | 1043       | 727          | 16,0                | 191            | 86             | 2836           |
| 2Z-46 | 5190            | 4418             | 772        | 648          | 15,8                | 141            | 0              | 2073           |
| 2Z-47 | 5324            | 4924             | 400        | 398          | 15,6                | 73             | 0              | 1061           |
| 2Z-48 | 5192            | 4873             | 319        | 595          | 15,6                | 58             | 73             | 845            |
| 2Z-49 | 5210            | 4720             | 490        | 645          | 16,0                | 90             | 0              | 1332           |
| 2Z-50 | 5193            | 4782             | 411        | 660          | 15,8                | 75             | 0              | 1103           |
| 2Z-51 | 5193            | 4593             | 600        | 613          | 16,2                | 110            | 200            | 1652           |
| 2Z-52 | 5431            | 4831             | 600        | 531          | 15,8                | 110            | 0              | 1612           |
| 2Z-53 | 5175            | 4775             | 400        | 325          | 16,0                | 73             | 250            | 1088           |
| 2Z-54 | 5179            | 4811             | 368        | 633          | 16,2                | 71             | 487            | 1014           |
| 2Z-55 | 5163            | 4633             | 530        | 350          | 15,8                | 97             | 1131           | 1423           |
| 2Z-56 | 5175            | 4160             | 1015       | 267          | 15,8                | 186            | 70             | 2726           |
| 2Z-57 | 4894            | 4385             | 509        | 251          | 16,2                | 93             | 60             | 1401           |
| 2Z-58 | 5178            | 4452             | 726        | 613          | 16,2                | 133            | 60             | 1999           |
| 2Z-59 | 4986            | 4836             | 150        | 165          | 16,2                | 27             | 0              | 412            |
| 2Z-60 | 5250            | 4840             | 410        | 650          | 15,8                | 75             | 0              | 1101           |

## B.1 Poços Campo Zeus

| Poço  | $\rho_l$<br>[lbm/gal] | $V_l$<br>[bbl] | $P_l$<br>[psi] | $\rho_{flush}$<br>[lbm/gal] | $V_{flush}$<br>[bbl] | $P_{flush}$<br>[psi] | $\rho_{spac}$<br>[lbm/gal] | $V_{spac}$<br>[bbl] | $P_{spac}$<br>[psi] |
|-------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| 2Z-01 | 11,3                  | 647            | 6437           | 9,9                         | 60                   | 1298                 | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| 2Z-02 | 10,2                  | 724            | 6509           | 9,9                         | 40                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-03 | 9,8                   | 704            | 6081           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-04 | 9,8                   | 787            | 6791           | 9,9                         | 60                   | 1175                 | 12,7                       | 105                 | 1175                |
| 2Z-05 | 9,7                   | 668            | 5708           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-06 | 9,6                   | 688            | 5817           | 9,9                         | 60                   | 885                  | 12,7                       | 75                  | 885                 |
| 2Z-07 | 9,4                   | 614            | 5080           | 9,9                         | 60                   | 1416                 | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2Z-08 | 9,2                   | 693            | 5618           | 9,9                         | 60                   | 1119                 | 12,7                       | 100                 | 1119                |
| 2Z-09 | 9,3                   | 711            | 5826           | 9,9                         | 60                   | 1416                 | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2Z-10 | 9,6                   | 714            | 6041           | 9,9                         | 60                   | 472                  | 12,7                       | 40                  | 472                 |
| 2Z-11 | 9,8                   | 698            | 6027           | 9,9                         | 60                   | 944                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2Z-12 | 9,7                   | 626            | 5351           | 9,9                         | 100                  | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-13 | 9,8                   | 646            | 5574           | 9,9                         | 100                  | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-14 | 9,8                   | 698            | 6025           | 9,9                         | 60                   | 1475                 | 12,7                       | 125                 | 1475                |
| 2Z-15 | 9,6                   | 755            | 6380           | 9,9                         | 60                   | 944                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2Z-16 | 9,7                   | 703            | 6006           | 9,9                         | 72                   | 1298                 | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| 2Z-17 | 9,9                   | 649            | 5662           | 9,9                         | 40                   | 1888                 | 12,7                       | 160                 | 1888                |
| 2Z-18 | 9,8                   | 603            | 5207           | 9,9                         | 80                   | 1888                 | 12,7                       | 160                 | 1888                |
| 2Z-19 | 10                    | 784            | 6902           | 9,9                         | 60                   | 142                  | 12,7                       | 12                  | 142                 |
| 2Z-20 | 9,8                   | 660            | 5697           | 9,9                         | 70                   | 1298                 | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| 2Z-21 | 9,8                   | 686            | 5919           | 9,9                         | 50                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-22 | 10,3                  | 693            | 6285           | 9,9                         | 50                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-23 | 9                     | 798            | 6329           | 9,9                         | 60                   | 1119                 | 12,7                       | 100                 | 1119                |
| 2Z-24 | 9,5                   | 601            | 5033           | 9,9                         | 60                   | 1416                 | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2Z-25 | 9,6                   | 607            | 5132           | 9,9                         | 60                   | 1416                 | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2Z-26 | 9,6                   | 637            | 5390           | 9,9                         | 50                   | 1416                 | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2Z-27 | 9,4                   | 603            | 4991           | 9,9                         | 65                   | 1239                 | 12,7                       | 105                 | 1239                |
| 2Z-28 | 9,9                   | 683            | 5955           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-29 | 9,7                   | 819            | 6995           | 9,9                         | 60                   | 1119                 | 12,7                       | 100                 | 1119                |
| 2Z-30 | 9,6                   | 678            | 5737           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-31 | 9,6                   | 645            | 5456           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-32 | 9,7                   | 706            | 6034           | 9,9                         | 60                   | 1062                 | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| 2Z-33 | 9,7                   | 741            | 6329           | 9,9                         | 60                   | 944                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2Z-34 | 9,9                   | 684            | 5968           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-35 | 9,4                   | 685            | 5675           | 9,9                         | 60                   | 1121                 | 12,7                       | 95                  | 1121                |
| 2Z-36 | 9,7                   | 706            | 6034           | 9,9                         | 60                   | 1085                 | 12,7                       | 92                  | 1085                |
| 2Z-37 | 9,7                   | 639            | 5457           | 9,9                         | 60                   | 1062                 | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| 2Z-38 | 9,7                   | 681            | 5820           | 9,9                         | 60                   | 1038                 | 12,7                       | 88                  | 1038                |
| 2Z-39 | 9,3                   | 658            | 5393           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-40 | 9,8                   | 654            | 5648           | 9,9                         | 80                   | 944                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2Z-41 | 9,5                   | 693            | 5801           | 9,9                         | 60                   | 1062                 | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| 2Z-42 | 9,8                   | 707            | 6107           | 9,9                         | 60                   | 944                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2Z-43 | 9,8                   | 833            | 7192           | 9,9                         | 60                   | 783                  | 12,7                       | 70                  | 783                 |

| Poço  | $\rho_l$<br>[lbm/gal] | $V_l$<br>[bbl] | $P_l$<br>[psi] | $\rho_{flush}$<br>[lbm/gal] | $V_{flush}$<br>[bbl] | $P_{flush}$<br>[psi] | $\rho_{spac}$<br>[lbm/gal] | $V_{spac}$<br>[bbl] | $P_{spac}$<br>[psi] |
|-------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| 2Z-44 | 9,7                   | 656            | 5605           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-45 | 9,6                   | 519            | 4392           | 9,9                         | 100                  | 1770                 | 12,7                       | 150                 | 1770                |
| 2Z-46 | 9,8                   | 649            | 5598           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-47 | 9,7                   | 751            | 6417           | 9,9                         | 60                   | 1062                 | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| 2Z-48 | 9,8                   | 732            | 6317           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-49 | 9,8                   | 744            | 6421           | 9,9                         | 40                   | 944                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2Z-50 | 9,9                   | 705            | 6149           | 9,9                         | 80                   | 1062                 | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| 2Z-51 | 9,8                   | 660            | 5701           | 9,9                         | 80                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-52 | 9,8                   | 704            | 6077           | 9,9                         | 70                   | 1298                 | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| 2Z-53 | 10,5                  | 714            | 6602           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-54 | 9,9                   | 749            | 6527           | 9,9                         | 60                   | 1342                 | 12,7                       | 120                 | 1342                |
| 2Z-55 | 9,9                   | 668            | 5824           | 9,9                         | 60                   | 1416                 | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2Z-56 | 9,3                   | 601            | 4926           | 9,9                         | 60                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2Z-57 | 9,7                   | 623            | 5319           | 9,9                         | 60                   | 1416                 | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2Z-58 | 9,5                   | 625            | 5228           | 9,9                         | 80                   | 1298                 | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| 2Z-59 | 9,6                   | 744            | 6292           | 9,9                         | 53                   | 1038                 | 12,7                       | 88                  | 1038                |
| 2Z-60 | 9,2                   | 706            | 5719           | 9,9                         | 80                   | 1180                 | 12,7                       | 100                 | 1180                |

## B.1 Poços Campo Zeus

| Poço  | $\Delta P_c$<br>[psi] | $\Delta P_l$<br>[psi] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $Q_b$<br>[bbl/<br>min] | $Q_e$<br>[bbl/<br>min] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 2Z-01 | 226                   | 88                    | 10227             | 8348               | 15,0                   | 15,0                   | 3743                   | 0                   | 3055                    | 688                      |
| 2Z-02 | 259                   | 81                    | 10157             | 8113               | 14,0                   | 14,0                   | 3470                   | 0                   | 2771                    | 698                      |
| 2Z-03 | 253                   | 67                    | 10016             | 7859               | 13,0                   | 13,0                   | 3177                   | 0                   | 2493                    | 684                      |
| 2Z-04 | 56                    | 24                    | 9246              | 8385               | 12,0                   | 2,1                    | 2707                   | 2034                | 421                     | 43                       |
| 2Z-05 | 146                   | 43                    | 8676              | 7470               | 14,0                   | 14,0                   | 2964                   | 0                   | 2552                    | 412                      |
| 2Z-06 | 145                   | 37                    | 8499              | 7280               | 13,0                   | 13,0                   | 2696                   | 0                   | 2309                    | 387                      |
| 2Z-07 | 383                   | 110                   | 10292             | 7124               | 14,0                   | 14,0                   | 3516                   | 0                   | 2433                    | 1082                     |
| 2Z-08 | 194                   | 103                   | 10121             | 7192               | 14,0                   | 4,6                    | 3457                   | 1649                | 808                     | 329                      |
| 2Z-09 | 235                   | 67                    | 9827              | 7840               | 14,0                   | 3,9                    | 3357                   | 1930                | 749                     | 190                      |
| 2Z-10 | 224                   | 66                    | 8964              | 7110               | 14,0                   | 14,0                   | 3062                   | 0                   | 2429                    | 633                      |
| 2Z-11 | 244                   | 73                    | 9589              | 7573               | 14,0                   | 14,0                   | 3276                   | 0                   | 2587                    | 689                      |
| 2Z-12 | 125                   | 29                    | 8549              | 7470               | 12,0                   | 12,0                   | 2503                   | 0                   | 2187                    | 316                      |
| 2Z-13 | 253                   | 85                    | 9788              | 7732               | 15,0                   | 15,0                   | 3582                   | 0                   | 2830                    | 752                      |
| 2Z-14 | 151                   | 35                    | 9388              | 8076               | 12,0                   | 9,4                    | 2749                   | 520                 | 1845                    | 300                      |
| 2Z-15 | 143                   | 42                    | 9077              | 7905               | 14,0                   | 3,6                    | 3101                   | 2001                | 699                     | 104                      |
| 2Z-16 | 188                   | 56                    | 9559              | 8004               | 14,0                   | 14,0                   | 3266                   | 0                   | 2734                    | 531                      |
| 2Z-17 | 230                   | 61                    | 9895              | 7961               | 13,0                   | 5,7                    | 3139                   | 1423                | 1102                    | 268                      |
| 2Z-18 | 251                   | 75                    | 9961              | 7883               | 14,0                   | 6,7                    | 3403                   | 1401                | 1292                    | 340                      |
| 2Z-19 | 217                   | 58                    | 9464              | 7636               | 13,0                   | 13,0                   | 3002                   | 0                   | 2422                    | 580                      |
| 2Z-20 | 240                   | 55                    | 9767              | 7677               | 12,0                   | 2,7                    | 2860                   | 1747                | 501                     | 136                      |
| 2Z-21 | 247                   | 57                    | 9774              | 7599               | 12,0                   | 12,0                   | 2862                   | 0                   | 2225                    | 637                      |
| 2Z-22 | 212                   | 51                    | 9702              | 7960               | 12,0                   | 12,0                   | 2841                   | 0                   | 2331                    | 510                      |
| 2Z-23 | 34                    | 18                    | 8345              | 7831               | 14,0                   | 2,7                    | 2851                   | 2156                | 519                     | 34                       |
| 2Z-24 | 275                   | 80                    | 9383              | 7056               | 14,0                   | 14,0                   | 3205                   | 0                   | 2410                    | 795                      |
| 2Z-25 | 360                   | 106                   | 10219             | 7173               | 14,0                   | 14,0                   | 3491                   | 0                   | 2450                    | 1040                     |
| 2Z-26 | 244                   | 71                    | 9377              | 7315               | 14,0                   | 14,0                   | 3203                   | 0                   | 2499                    | 704                      |
| 2Z-27 | 405                   | 116                   | 10256             | 6909               | 14,0                   | 14,0                   | 3503                   | 0                   | 2360                    | 1144                     |
| 2Z-28 | 219                   | 66                    | 9563              | 7733               | 14,0                   | 14,0                   | 3267                   | 0                   | 2641                    | 625                      |
| 2Z-29 | 54                    | 30                    | 9300              | 8490               | 14,0                   | 2,9                    | 3177                   | 2292                | 608                     | 58                       |
| 2Z-30 | 267                   | 78                    | 9702              | 7523               | 14,0                   | 5,4                    | 3314                   | 1575                | 995                     | 288                      |
| 2Z-31 | 286                   | 84                    | 9611              | 7246               | 14,0                   | 5,8                    | 3283                   | 1449                | 1026                    | 335                      |
| 2Z-32 | 251                   | 74                    | 9778              | 7700               | 14,0                   | 6,2                    | 3340                   | 1463                | 1167                    | 315                      |
| 2Z-33 | 123                   | 36                    | 8864              | 7850               | 14,0                   | 7,0                    | 3028                   | 1333                | 1349                    | 174                      |
| 2Z-34 | 222                   | 67                    | 9580              | 7746               | 14,0                   | 14,0                   | 3272                   | 0                   | 2646                    | 626                      |
| 2Z-35 | 164                   | 47                    | 8739              | 7380               | 14,0                   | 14,0                   | 2985                   | 0                   | 2521                    | 464                      |
| 2Z-36 | 217                   | 57                    | 9540              | 7711               | 13,0                   | 13,0                   | 3026                   | 0                   | 2446                    | 580                      |
| 2Z-37 | 281                   | 83                    | 9451              | 7129               | 14,0                   | 14,0                   | 3229                   | 0                   | 2435                    | 793                      |
| 2Z-38 | 270                   | 70                    | 9783              | 7459               | 13,0                   | 5,4                    | 3103                   | 1377                | 989                     | 308                      |
| 2Z-39 | 285                   | 81                    | 9590              | 7181               | 14,0                   | 6,7                    | 3276                   | 1276                | 1177                    | 395                      |
| 2Z-40 | 219                   | 50                    | 9268              | 7363               | 12,0                   | 12,0                   | 2714                   | 0                   | 2156                    | 558                      |
| 2Z-41 | 251                   | 73                    | 9520              | 7466               | 14,0                   | 5,6                    | 3252                   | 1538                | 1012                    | 279                      |
| 2Z-42 | 228                   | 68                    | 9532              | 7650               | 14,0                   | 7,9                    | 3256                   | 1131                | 1482                    | 365                      |

| Poço  | $\Delta P_c$<br>[psi] | $\Delta P_l$<br>[psi] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $Q_b$<br>[bbl/<br>min] | $Q_e$<br>[bbl/<br>min] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 2Z-43 | 29                    | 15                    | 8803              | 8364               | 13,0                   | 1,4                    | 2792                   | 2374                | 279                     | 15                       |
| 2Z-44 | 244                   | 72                    | 9407              | 7387               | 14,0                   | 14,0                   | 3213                   | 0                   | 2523                    | 690                      |
| 2Z-45 | 368                   | 83                    | 10343             | 7139               | 12,0                   | 8,3                    | 3029                   | 649                 | 1441                    | 647                      |
| 2Z-46 | 272                   | 63                    | 9719              | 7373               | 12,0                   | 12,0                   | 2846                   | 0                   | 2159                    | 687                      |
| 2Z-47 | 141                   | 32                    | 9255              | 8053               | 12,0                   | 12,0                   | 2710                   | 0                   | 2358                    | 352                      |
| 2Z-48 | 113                   | 26                    | 9024              | 8067               | 12,0                   | 5,3                    | 2642                   | 1313                | 1049                    | 125                      |
| 2Z-49 | 181                   | 54                    | 9283              | 7770               | 14,0                   | 14,0                   | 3171                   | 0                   | 2654                    | 517                      |
| 2Z-50 | 149                   | 40                    | 9226              | 7974               | 13,0                   | 13,0                   | 2927                   | 0                   | 2530                    | 397                      |
| 2Z-51 | 212                   | 49                    | 9515              | 7650               | 12,0                   | 4,3                    | 2786                   | 1446                | 794                     | 193                      |
| 2Z-52 | 212                   | 49                    | 9876              | 8052               | 12,0                   | 12,0                   | 2892                   | 0                   | 2358                    | 534                      |
| 2Z-53 | 141                   | 35                    | 9587              | 8358               | 12,0                   | 2,7                    | 2807                   | 1893                | 554                     | 82                       |
| 2Z-54 | 72                    | 41                    | 9344              | 8258               | 14,0                   | 1,8                    | 3192                   | 2462                | 359                     | 47                       |
| 2Z-55 | 187                   | 43                    | 9432              | 7822               | 12,0                   | 0,9                    | 2762                   | 2109                | 181                     | 37                       |
| 2Z-56 | 375                   | 106                   | 9833              | 6732               | 14,0                   | 10,2                   | 3359                   | 629                 | 1670                    | 770                      |
| 2Z-57 | 188                   | 56                    | 8914              | 7325               | 14,0                   | 8,5                    | 3045                   | 981                 | 1522                    | 330                      |
| 2Z-58 | 268                   | 78                    | 9583              | 7316               | 14,0                   | 9,6                    | 3273                   | 778                 | 1721                    | 533                      |
| 2Z-59 | 53                    | 12                    | 8291              | 7826               | 12,0                   | 12,0                   | 2428                   | 0                   | 2291                    | 136                      |
| 2Z-60 | 152                   | 43                    | 8917              | 7664               | 14,0                   | 14,0                   | 3046                   | 0                   | 2618                    | 428                      |

## B.1 Poços Campo Zeus

| Poço  | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ | <i>Aval. Perfil</i> |
|-------|----------|----------|-------|------|-------|---------------------|
| 2Z-01 | 1,15     | 1,20     | 0,96  | 1,00 | 0,95  | 1 Excelente         |
| 2Z-02 | 1,00     | 1,04     | 0,96  | 0,78 | 0,75  | 1 Excelente         |
| 2Z-03 | 0,98     | 1,01     | 0,97  | 0,97 | 0,94  | 2 Boa               |
| 2Z-04 | 0,14     | 0,86     | 0,17  | 0,80 | 0,13  | 4 Ruim              |
| 2Z-05 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 0,72 | 0,70  | 1 Excelente         |
| 2Z-06 | 0,97     | 1,00     | 0,97  | 1,15 | 1,00  | 2 Boa               |
| 2Z-07 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,53 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-08 | 0,33     | 1,04     | 0,32  | 1,36 | 0,43  | 4 Ruim              |
| 2Z-09 | 0,30     | 1,10     | 0,27  | 1,64 | 0,44  | 2 Boa               |
| 2Z-10 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 0,95 | 0,92  | 3 Média             |
| 2Z-11 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,17 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-12 | 0,89     | 0,91     | 0,97  | 0,80 | 0,78  | 2 Boa               |
| 2Z-13 | 1,12     | 1,17     | 0,96  | 1,46 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-14 | 0,70     | 0,92     | 0,76  | 0,75 | 0,57  | 1 Excelente         |
| 2Z-15 | 0,27     | 1,07     | 0,25  | 0,66 | 0,16  | 2 Boa               |
| 2Z-16 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,40 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-17 | 0,42     | 1,00     | 0,42  | 0,99 | 0,42  | 3 Média             |
| 2Z-18 | 0,50     | 1,08     | 0,46  | 0,96 | 0,44  | 1 Excelente         |
| 2Z-19 | 0,97     | 1,00     | 0,97  | 1,06 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-20 | 0,20     | 0,92     | 0,22  | 1,12 | 0,24  | 2 Boa               |
| 2Z-21 | 0,91     | 0,93     | 0,97  | 0,90 | 0,87  | 1 Excelente         |
| 2Z-22 | 0,85     | 0,87     | 0,97  | 0,85 | 0,83  | 1 Excelente         |
| 2Z-23 | 0,20     | 1,04     | 0,19  | 0,40 | 0,08  | 5 Péssima           |
| 2Z-24 | 1,07     | 1,10     | 0,97  | 1,43 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-25 | 1,07     | 1,10     | 0,97  | 1,99 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-26 | 1,07     | 1,10     | 0,97  | 1,36 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-27 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,43 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-28 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 1,19 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-29 | 0,21     | 1,04     | 0,20  | 0,44 | 0,09  | 5 Péssima           |
| 2Z-30 | 0,40     | 1,07     | 0,37  | 1,30 | 0,48  | 3 Média             |
| 2Z-31 | 0,43     | 1,08     | 0,40  | 1,24 | 0,50  | 2 Boa               |
| 2Z-32 | 0,46     | 1,08     | 0,43  | 0,91 | 0,39  | 1 Excelente         |
| 2Z-33 | 0,52     | 1,08     | 0,49  | 0,57 | 0,28  | 3 Média             |
| 2Z-34 | 1,04     | 1,08     | 0,96  | 1,12 | 1,00  | 3 Média             |
| 2Z-35 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,85 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-36 | 0,97     | 1,00     | 0,97  | 1,03 | 1,00  | 2 Boa               |
| 2Z-37 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,58 | 1,00  | 3 Média             |
| 2Z-38 | 0,41     | 1,02     | 0,41  | 1,10 | 0,44  | 2 Boa               |
| 2Z-39 | 0,51     | 1,10     | 0,46  | 1,19 | 0,55  | 3 Média             |
| 2Z-40 | 0,90     | 0,92     | 0,97  | 1,26 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-41 | 0,41     | 1,07     | 0,38  | 0,94 | 0,36  | 1 Excelente         |
| 2Z-42 | 0,59     | 1,08     | 0,55  | 1,98 | 1,00  | 2 Boa               |
| 2Z-43 | 0,10     | 0,94     | 0,10  | 0,27 | 0,03  | 5 Péssima           |
| 2Z-44 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,81 | 1,00  | 2 Boa               |

| Poço  | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ | <i>Aval. Perfil</i> |
|-------|----------|----------|-------|------|-------|---------------------|
| 2Z-45 | 0,62     | 0,92     | 0,67  | 1,43 | 0,96  | 2 Boa               |
| 2Z-46 | 0,89     | 0,91     | 0,97  | 1,19 | 1,00  | 2 Boa               |
| 2Z-47 | 0,88     | 0,90     | 0,97  | 1,01 | 0,98  | 1 Excelente         |
| 2Z-48 | 0,39     | 0,90     | 0,43  | 0,54 | 0,23  | 2 Boa               |
| 2Z-49 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 0,76 | 0,73  | 3 Média             |
| 2Z-50 | 0,97     | 1,00     | 0,97  | 0,62 | 0,60  | 1 Excelente         |
| 2Z-51 | 0,32     | 0,93     | 0,35  | 0,98 | 0,34  | 3 Média             |
| 2Z-52 | 0,89     | 0,91     | 0,97  | 1,13 | 1,00  | 2 Boa               |
| 2Z-53 | 0,20     | 0,93     | 0,22  | 1,23 | 0,27  | 3 Média             |
| 2Z-54 | 0,13     | 1,05     | 0,12  | 0,58 | 0,07  | 5 Péssima           |
| 2Z-55 | 0,07     | 0,91     | 0,08  | 1,51 | 0,12  | 2 Boa               |
| 2Z-56 | 0,76     | 1,08     | 0,70  | 3,80 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2Z-57 | 0,65     | 1,10     | 0,59  | 2,03 | 1,00  | 2 Boa               |
| 2Z-58 | 0,74     | 1,10     | 0,67  | 1,18 | 0,79  | 3 Média             |
| 2Z-59 | 0,91     | 0,93     | 0,98  | 0,91 | 0,88  | 2 Boa               |
| 2Z-60 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 0,63 | 0,61  | 1 Excelente         |

## B.2 Poços Campo Urano

| Poço  | $D_{bh}$<br>[m] | $D_{toc}$<br>[m] | $L$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\rho$<br>[lbm/gal] | $V_t$<br>[bbl] | $V_p$<br>[bbl] | $P_c$<br>[psi] |
|-------|-----------------|------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| 2U-01 | 5248            | 4042             | 1206       | 775          | 15,8                | 221            | 210            | 3239           |
| 2U-02 | 4999            | 4499             | 500        | 349          | 15,8                | 92             | 0              | 1343           |
| 2U-03 | 5209            | 4609             | 600        | 666          | 15,8                | 116            | 190            | 1612           |
| 2U-04 | 5221            | 4871             | 350        | 305          | 15,8                | 64             | 0              | 940            |
| 2U-05 | 5380            | 4880             | 500        | 380          | 15,0                | 92             | 0              | 1275           |
| 2U-06 | 5194            | 4600             | 593        | 462          | 15,8                | 109            | 220            | 1593           |
| 2U-07 | 5334            | 4684             | 650        | 734          | 16,0                | 119            | 200            | 1768           |
| 2U-08 | 5390            | 4746             | 644        | 790          | 16,0                | 118            | 0              | 1752           |
| 2U-09 | 5194            | 4894             | 300        | 214          | 16,0                | 55             | 0              | 816            |
| 2U-10 | 5301            | 4877             | 424        | 518          | 15,8                | 78             | 0              | 1138           |
| 2U-11 | 5407            | 4781             | 626        | 377          | 15,8                | 115            | 0              | 1681           |
| 2U-12 | 5450            | 4800             | 650        | 620          | 15,8                | 119            | 0              | 1746           |
| 2U-13 | 5441            | 4950             | 491        | 515          | 15,8                | 90             | 0              | 1319           |

| Poço  | $\rho_l$<br>[lbm/gal] | $V_l$<br>[bbl] | $P_l$<br>[psi] | $\rho_{flush}$<br>[lbm/gal] | $V_{flush}$<br>[bbl] | $P_{flush}$<br>[psi] | $\rho_{spac}$<br>[lbm/gal] | $V_{spac}$<br>[bbl] | $P_{spac}$<br>[psi] |
|-------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| 2U-01 | 9,6                   | 633            | 5350           | 9,9                         | 97                   | 892                  | 12,7                       | 10                  | 118                 |
| 2U-02 | 9,8                   | 607            | 5242           | 9,9                         | 98                   | 901                  | 12,7                       | 118                 | 1392                |
| 2U-03 | 9,6                   | 749            | 6338           | 9,9                         | 40                   | 349                  | 12,7                       | 100                 | 1119                |
| 2U-04 | 9,6                   | 731            | 6185           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2U-05 | 9,8                   | 703            | 6069           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 130                 | 1534                |
| 2U-06 | 9                     | 702            | 5564           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2U-07 | 9,8                   | 723            | 6243           | 9,9                         | 54                   | 497                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2U-08 | 9,8                   | 739            | 6375           | 9,9                         | 40                   | 368                  | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| 2U-09 | 9,8                   | 702            | 6056           | 9,9                         | 80                   | 736                  | 12,7                       | 114                 | 1345                |
| 2U-10 | 9,7                   | 753            | 6430           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| 2U-11 | 9,8                   | 725            | 6257           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2U-12 | 10,1                  | 698            | 6213           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2U-13 | 9,5                   | 766            | 6408           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |

## B.2 Poços Campo Urano

| Poço  | $\Delta P_c$<br>[psi] | $\Delta P_l$<br>[psi] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $Q_b$<br>[bbl/<br>min] | $Q_e$<br>[bbl/<br>min] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 2U-01 | 426                   | 96                    | 10091             | 6427               | 12,0                   | 6,1                    | 2955                   | 918                 | 964                     | 550                      |
| 2U-02 | 185                   | 55                    | 9102              | 7574               | 14,0                   | 14,0                   | 3109                   | 0                   | 2587                    | 522                      |
| 2U-03 | 117                   | 65                    | 9428              | 7699               | 14,0                   | 5,3                    | 3221                   | 1634                | 996                     | 224                      |
| 2U-04 | 129                   | 38                    | 9012              | 7943               | 14,0                   | 14,0                   | 3079                   | 0                   | 2713                    | 365                      |
| 2U-05 | 177                   | 41                    | 9634              | 8183               | 12,0                   | 12,0                   | 2821                   | 0                   | 2396                    | 425                      |
| 2U-06 | 219                   | 60                    | 8914              | 7102               | 14,0                   | 4,6                    | 3045                   | 1624                | 802                     | 205                      |
| 2U-07 | 240                   | 72                    | 9741              | 7733               | 14,0                   | 5,2                    | 3328                   | 1656                | 985                     | 256                      |
| 2U-08 | 227                   | 52                    | 9820              | 7841               | 12,0                   | 12,0                   | 2875                   | 0                   | 2296                    | 579                      |
| 2U-09 | 111                   | 33                    | 9087              | 8160               | 14,0                   | 14,0                   | 3104                   | 0                   | 2787                    | 317                      |
| 2U-10 | 157                   | 46                    | 9252              | 7958               | 14,0                   | 14,0                   | 3161                   | 0                   | 2718                    | 442                      |
| 2U-11 | 226                   | 60                    | 9845              | 7939               | 13,0                   | 13,0                   | 3123                   | 0                   | 2518                    | 605                      |
| 2U-12 | 240                   | 74                    | 10219             | 8232               | 14,0                   | 14,0                   | 3491                   | 0                   | 2812                    | 678                      |
| 2U-13 | 182                   | 53                    | 9441              | 7941               | 14,0                   | 14,0                   | 3225                   | 0                   | 2713                    | 513                      |

| Poço  | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ | <i>Aval. Perfil</i> |
|-------|----------|----------|-------|------|-------|---------------------|
| 2U-01 | 0,46     | 0,91     | 0,50  | 1,56 | 0,78  | 2 Boa               |
| 2U-02 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,43 | 1,00  | 3 Média             |
| 2U-03 | 0,37     | 1,02     | 0,36  | 0,90 | 0,33  | 4 Ruim              |
| 2U-04 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 1,15 | 1,00  | 2 Boa               |
| 2U-05 | 0,85     | 0,87     | 0,97  | 1,32 | 1,00  | 3 Média             |
| 2U-06 | 0,34     | 1,08     | 0,32  | 1,29 | 0,41  | 3 Média             |
| 2U-07 | 0,39     | 1,09     | 0,36  | 0,89 | 0,32  | 3 Média             |
| 2U-08 | 0,90     | 0,92     | 0,97  | 0,82 | 0,79  | 2 Boa               |
| 2U-09 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 1,40 | 1,00  | 3 Média             |
| 2U-10 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 0,82 | 0,79  | 2 Boa               |
| 2U-11 | 0,97     | 1,00     | 0,97  | 1,66 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2U-12 | 1,04     | 1,08     | 0,96  | 1,05 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2U-13 | 1,04     | 1,08     | 0,97  | 0,95 | 0,92  | 1 Excelente         |

## B.3 Poços Campo Cronos

| Poço  | $D_{bh}$<br>[m] | $D_{toc}$<br>[m] | $L$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\rho$<br>[lbm/gal] | $V_t$<br>[bbl] | $V_p$<br>[bbl] | $P_c$<br>[psi] |
|-------|-----------------|------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| 2C-01 | 5342            | 4396             | 946        | 310          | 15,8                | 183            | 150            | 2540           |
| 2C-02 | 5277            | 4539             | 738        | 597          | 16,2                | 135            | 0              | 2032           |
| 2C-03 | 5010            | 4494             | 516        | 261          | 16,0                | 94             | 620            | 1403           |
| 2C-04 | 4936            | 4360             | 576        | 526          | 15,8                | 105            | 0              | 1547           |
| 2C-05 | 5106            | 4480             | 626        | 517          | 16,2                | 115            | 0              | 1724           |

| Poço  | $\rho_l$<br>[lbm/gal] | $V_l$<br>[bbl] | $P_l$<br>[psi] | $\rho_{flush}$<br>[lbm/gal] | $V_{flush}$<br>[bbl] | $P_{flush}$<br>[psi] | $\rho_{spac}$<br>[lbm/gal] | $V_{spac}$<br>[bbl] | $P_{spac}$<br>[psi] |
|-------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| 2C-01 | 8,9                   | 669            | 5241           | 9,9                         | 60                   | 523                  | 12,7                       | 120                 | 1342                |
| 2C-02 | 9,7                   | 641            | 5474           | 9,9                         | 70                   | 644                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| 2C-03 | 9,1                   | 672            | 5390           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| 2C-04 | 9,9                   | 638            | 5562           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| 2C-05 | 9,2                   | 660            | 5347           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |

| Poço  | $\Delta P_c$<br>[psi] | $\Delta P_l$<br>[psi] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $Q_b$<br>[bbl/<br>min] | $Q_e$<br>[bbl/<br>min] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 2C-01 | 176                   | 70                    | 9773              | 7056               | 12,0                   | 6,6                    | 2861                   | 932                 | 1134                    | 437                      |
| 2C-02 | 273                   | 81                    | 9895              | 7589               | 14,0                   | 14,0                   | 3380                   | 0                   | 2593                    | 788                      |
| 2C-03 | 191                   | 53                    | 8635              | 7041               | 14,0                   | 1,9                    | 2950                   | 2087                | 318                     | 72                       |
| 2C-04 | 213                   | 64                    | 9099              | 7339               | 14,0                   | 14,0                   | 3108                   | 0                   | 2507                    | 601                      |
| 2C-05 | 231                   | 65                    | 9079              | 7124               | 14,0                   | 14,0                   | 3102                   | 0                   | 2434                    | 668                      |

| Poço  | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ | <i>Aval. Perfil</i> |
|-------|----------|----------|-------|------|-------|---------------------|
| 2C-01 | 0,46     | 0,86     | 0,54  | 3,05 | 1,00  | 4 Ruim              |
| 2C-02 | 1,07     | 1,10     | 0,97  | 1,24 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2C-03 | 0,14     | 1,09     | 0,13  | 1,97 | 0,25  | 2 Boa               |
| 2C-04 | 1,04     | 1,08     | 0,96  | 1,10 | 1,00  | 1 Excelente         |
| 2C-05 | 1,07     | 1,10     | 0,97  | 1,21 | 1,00  | 1 Excelente         |

## B.4 Poços Campo Reia

| Poço | $D_{bh}$<br>[m] | $D_{toc}$<br>[m] | $L$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\rho$<br>[lbm/gal] | $V_t$<br>[bbl] | $V_p$<br>[bbl] | $P_c$<br>[psi] |
|------|-----------------|------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| R-01 | 5793            | 4902             | 892        | 766          | 16,2                | 163            | 0              | 2456           |
| R-02 | 5614            | 5021             | 593        | 587          | 16,0                | 109            | 235            | 1613           |
| R-02 | 5817            | 4982             | 835        | 961          | 15,8                | 153            | 200            | 2242           |
| R-04 | 5949            | 5250             | 699        | 844          | 15,6                | 128            | 100            | 1853           |

| Poço | $\rho_l$<br>[lbm/gal] | $V_l$<br>[bbl] | $P_l$<br>[psi] | $\rho_{flush}$<br>[lbm/gal] | $V_{flush}$<br>[bbl] | $P_{flush}$<br>[psi] | $\rho_{spac}$<br>[lbm/gal] | $V_{spac}$<br>[bbl] | $P_{spac}$<br>[psi] |
|------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| R-01 | 9,9                   | 737            | 6427           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| R-02 | 9,9                   | 779            | 6792           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| R-02 | 9,9                   | 772            | 6730           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| R-04 | 9,8                   | 821            | 7085           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |

| Poço | $\Delta P_c$<br>[psi] | $\Delta P_l$<br>[psi] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $Q_b$<br>[bbl/<br>min] | $Q_e$<br>[bbl/<br>min] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| R-01 | 315                   | 73                    | 10980             | 8209               | 12,0                   | 12,0                   | 3215                   | 0                   | 2404                    | 811                      |
| R-02 | 219                   | 66                    | 10192             | 8359               | 14,0                   | 4,4                    | 3481                   | 1954                | 902                     | 198                      |
| R-02 | 309                   | 93                    | 10841             | 8290               | 14,0                   | 6,1                    | 3703                   | 1606                | 1226                    | 377                      |
| R-04 | 258                   | 77                    | 10746             | 8635               | 14,0                   | 7,9                    | 3671                   | 1294                | 1655                    | 405                      |

| Poço | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ | <i>Aval. Perfil</i> |
|------|----------|----------|-------|------|-------|---------------------|
| R-01 | 0,91     | 0,93     | 0,97  | 1,16 | 1,00  | 1 Excelente         |
| R-02 | 0,33     | 1,09     | 0,30  | 1,01 | 0,31  | 1 Excelente         |
| R-02 | 0,45     | 1,08     | 0,42  | 0,87 | 0,36  | 3 Média             |
| R-04 | 0,58     | 1,07     | 0,54  | 0,83 | 0,45  | 1 Excelente         |

## B.5 Poços Campo Apolo

| Poço | $D_{bh}$<br>[m] | $D_{toc}$<br>[m] | $L$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\rho$<br>[lbm/gal] | $V_t$<br>[bbl] | $V_p$<br>[bbl] | $P_c$<br>[psi] |
|------|-----------------|------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| A-01 | 5316            | 4740             | 712        | 754          | 16,0                | 105            | 0              | 1567           |
| A-02 | 5890            | 5085             | 874        | 759          | 16,0                | 147            | 150            | 2190           |
| A-03 | 5818            | 4925             | 908        | 765          | 16,2                | 163            | 28             | 2459           |
| A-04 | 5881            | 5169             | 1170       | 709          | 16,0                | 130            | 0              | 1937           |
| A-05 | 5329            | 4456             | 700        | 937          | 16,2                | 160            | 37             | 2406           |
| A-06 | 5848            | 4940             | 800        | 770          | 16,2                | 175            | 1121           | 2501           |
| A-07 | 5870            | 4700             | 1060       | 834          | 15,8                | 214            | 38             | 3143           |
| A-08 | 5933            | 5233             | 984        | 1131         | 15,8                | 128            | 0              | 1880           |
| A-09 | 5945            | 5145             | 909        | 765          | 15,8                | 146            | 40             | 2149           |
| A-10 | 5916            | 4856             | 859        | 835          | 16,2                | 194            | 250            | 2919           |
| A-11 | 5850            | 4866             | 900        | 673          | 16,0                | 180            | 250            | 2676           |
| A-12 | 6084            | 5175             | 1163       | 755          | 16,0                | 166            | 232            | 2472           |
| A-13 | 5971            | 5112             | 1149       | 839          | 16,0                | 157            | 315            | 2336           |
| A-14 | 6279            | 5379             | 1292       | 819          | 16,0                | 165            | 0              | 2448           |
| A-15 | 6213            | 5050             | 1057       | 1394         | 16,0                | 213            | 0              | 3163           |
| A-16 | 5958            | 4810             | 600        | 1078         | 16,2                | 210            | 377            | 3164           |
| A-17 | 5922            | 4630             | 803        | 834          | 16,2                | 236            | 420            | 3557           |
| A-18 | 6007            | 4950             | 973        | 1060         | 15,8                | 193            | 420            | 2838           |
| A-19 | 5930            | 5330             | 900        | 754          | 15,6                | 110            | 531            | 1591           |
| A-20 | 6039            | 5236             | 1068       | 759          | 16,0                | 147            | 0              | 2184           |
| A-21 | 5923            | 4950             | 759        | 765          | 15,8                | 188            | 182            | 2614           |
| A-22 | 6288            | 5388             | 900        | 709          | 16,2                | 174            | 100            | 2479           |
| A-23 | 6135            | 5067             | 712        | 937          | 15,6                | 195            | 496            | 2832           |
| A-24 | 5844            | 5085             | 874        | 770          | 15,6                | 139            | 150            | 2012           |
| A-25 | 6197            | 5297             | 908        | 834          | 15,8                | 165            | 0              | 2417           |

## B.5 Poços Campo Apolo

| Poço | $\rho_l$<br>[lbm/gal] | $V_l$<br>[bbl] | $P_l$<br>[psi] | $\rho_{flush}$<br>[lbm/gal] | $V_{flush}$<br>[bbl] | $P_{flush}$<br>[psi] | $\rho_{spac}$<br>[lbm/gal] | $V_{spac}$<br>[bbl] | $P_{spac}$<br>[psi] |
|------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| A-01 | 9,9                   | 798            | 6956           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| A-02 | 9,9                   | 762            | 6641           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-03 | 9,9                   | 709            | 6180           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-04 | 9,9                   | 721            | 6283           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| A-05 | 9,9                   | 767            | 6689           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-06 | 9,9                   | 755            | 6588           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-07 | 9,9                   | 804            | 7014           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-08 | 9,9                   | 764            | 6664           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| A-09 | 9,9                   | 690            | 6018           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 130                 | 1534                |
| A-10 | 9,9                   | 667            | 5820           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-11 | 9,9                   | 746            | 6504           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| A-12 | 9,9                   | 835            | 7285           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| A-13 | 9,9                   | 818            | 7135           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 90                  | 1062                |
| A-14 | 9,9                   | 690            | 6020           | 9,9                         | 80                   | 698                  | 12,7                       | 185                 | 2070                |
| A-15 | 9,9                   | 900            | 7847           | 9,9                         | 40                   | 349                  | 12,7                       | 100                 | 1119                |
| A-16 | 9,9                   | 787            | 6865           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| A-17 | 9,9                   | 771            | 6720           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| A-18 | 9,9                   | 829            | 7232           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| A-19 | 9,9                   | 798            | 6956           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| A-20 | 9,9                   | 762            | 6641           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-21 | 9,9                   | 709            | 6180           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-22 | 9,9                   | 721            | 6283           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 110                 | 1298                |
| A-23 | 9,9                   | 767            | 6689           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-24 | 9,9                   | 755            | 6588           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| A-25 | 9,9                   | 804            | 7014           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |

## B.5 Poços Campo Apolo

| Poço | $\Delta P_c$<br>[psi] | $\Delta P_l$<br>[psi] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $Q_b$<br>[bbl/<br>min] | $Q_e$<br>[bbl/<br>min] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| A-01 | 213                   | 64                    | 9725              | 7945               | 14,0                   | 14,0                   | 3322                   | 0                   | 2714                    | 608                      |
| A-02 | 298                   | 90                    | 11001             | 8514               | 14,0                   | 6,9                    | 3758                   | 1467                | 1441                    | 421                      |
| A-03 | 330                   | 101                   | 11150             | 8361               | 14,0                   | 12,0                   | 3809                   | 418                 | 2438                    | 814                      |
| A-04 | 263                   | 80                    | 10840             | 8640               | 14,0                   | 14,0                   | 3703                   | 0                   | 2952                    | 751                      |
| A-05 | 323                   | 98                    | 10305             | 7576               | 14,0                   | 11,4                   | 3520                   | 486                 | 2102                    | 757                      |
| A-06 | 169                   | 74                    | 11209             | 8539               | 12,0                   | 1,6                    | 3282                   | 2162                | 338                     | 106                      |
| A-07 | 433                   | 131                   | 11564             | 7989               | 14,0                   | 11,9                   | 3950                   | 411                 | 2318                    | 1037                     |
| A-08 | 259                   | 78                    | 10907             | 8768               | 14,0                   | 14,0                   | 3726                   | 0                   | 2995                    | 731                      |
| A-09 | 282                   | 66                    | 11085             | 8654               | 12,0                   | 9,4                    | 3246                   | 544                 | 1990                    | 559                      |
| A-10 | 392                   | 118                   | 11541             | 8230               | 14,0                   | 6,1                    | 3942                   | 1583                | 1228                    | 494                      |
| A-11 | 364                   | 110                   | 11249             | 8209               | 14,0                   | 5,9                    | 3843                   | 1630                | 1174                    | 435                      |
| A-12 | 336                   | 102                   | 11535             | 8727               | 14,0                   | 5,8                    | 3940                   | 1736                | 1245                    | 401                      |
| A-13 | 318                   | 96                    | 11276             | 8622               | 14,0                   | 4,7                    | 3852                   | 1965                | 980                     | 302                      |
| A-14 | 333                   | 101                   | 11832             | 9052               | 14,0                   | 14,0                   | 4042                   | 0                   | 3092                    | 950                      |
| A-15 | 430                   | 130                   | 12079             | 8486               | 14,0                   | 14,0                   | 4126                   | 0                   | 2899                    | 1228                     |
| A-16 | 425                   | 128                   | 11782             | 8193               | 14,0                   | 5,0                    | 4025                   | 1797                | 1002                    | 439                      |
| A-17 | 456                   | 106                   | 11874             | 7861               | 12,0                   | 4,3                    | 3477                   | 1473                | 829                     | 423                      |
| A-18 | 373                   | 87                    | 11508             | 8296               | 12,0                   | 3,8                    | 3369                   | 1663                | 766                     | 296                      |
| A-19 | 222                   | 67                    | 10640             | 8827               | 14,0                   | 2,4                    | 3635                   | 2499                | 517                     | 106                      |
| A-20 | 297                   | 90                    | 11200             | 8719               | 14,0                   | 14,0                   | 3826                   | 0                   | 2978                    | 848                      |
| A-21 | 190                   | 109                   | 11498             | 8695               | 14,0                   | 7,1                    | 3928                   | 1462                | 1508                    | 486                      |
| A-22 | 179                   | 115                   | 11843             | 9185               | 15,0                   | 9,5                    | 4335                   | 1228                | 2134                    | 617                      |
| A-23 | 395                   | 119                   | 11671             | 8444               | 14,0                   | 4,0                    | 3987                   | 2069                | 815                     | 311                      |
| A-24 | 281                   | 85                    | 10803             | 8510               | 14,0                   | 6,7                    | 3690                   | 1510                | 1397                    | 376                      |
| A-25 | 333                   | 101                   | 11548             | 8798               | 14,0                   | 14,0                   | 3945                   | 0                   | 3005                    | 939                      |

## B.5 Poços Campo Apolo

| Poço | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ | <i>Aval. Perfil</i> |
|------|----------|----------|-------|------|-------|---------------------|
| A-01 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 2,46 | 1,00  | 2 Boa               |
| A-02 | 0,52     | 1,09     | 0,48  | 1,00 | 0,48  | 3 Média             |
| A-03 | 0,91     | 1,11     | 0,82  | 1,20 | 0,99  | 1 Excelente         |
| A-04 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 0,89 | 0,86  | 1 Excelente         |
| A-05 | 0,87     | 1,11     | 0,78  | 3,32 | 1,00  | 1 Excelente         |
| A-06 | 0,12     | 0,88     | 0,13  | 1,25 | 0,16  | 4 Ruim              |
| A-07 | 0,89     | 1,08     | 0,82  | 1,39 | 1,00  | 1 Excelente         |
| A-08 | 1,04     | 1,08     | 0,96  | 0,93 | 0,90  | 2 Boa               |
| A-09 | 0,70     | 0,91     | 0,76  | 1,05 | 0,81  | 1 Excelente         |
| A-10 | 0,47     | 1,11     | 0,42  | 1,39 | 0,58  | 1 Excelente         |
| A-11 | 0,44     | 1,09     | 0,40  | 1,39 | 0,56  | 1 Excelente         |
| A-12 | 0,44     | 1,09     | 0,40  | 0,97 | 0,39  | 1 Excelente         |
| A-13 | 0,35     | 1,09     | 0,32  | 1,12 | 0,36  | 1 Excelente         |
| A-14 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 1,08 | 1,00  | 1 Excelente         |
| A-15 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 1,03 | 0,99  | 1 Excelente         |
| A-16 | 0,38     | 1,11     | 0,35  | 1,50 | 0,52  | 1 Excelente         |
| A-17 | 0,33     | 0,93     | 0,35  | 1,55 | 0,54  | 1 Excelente         |
| A-18 | 0,28     | 0,91     | 0,31  | 1,57 | 0,48  | 1 Excelente         |
| A-19 | 0,18     | 1,07     | 0,17  | 0,79 | 0,13  | 3 Média             |
| A-20 | 1,06     | 1,09     | 0,97  | 0,96 | 0,92  | 1 Excelente         |
| A-21 | 0,50     | 1,02     | 0,49  | 1,19 | 0,58  | 4 Ruim              |
| A-22 | 0,69     | 1,13     | 0,61  | 0,65 | 0,39  | 4 Ruim              |
| A-23 | 0,29     | 1,07     | 0,27  | 0,99 | 0,27  | 1 Excelente         |
| A-24 | 0,50     | 1,07     | 0,46  | 0,91 | 0,42  | 1 Excelente         |
| A-25 | 1,04     | 1,08     | 0,96  | 0,85 | 0,82  | 2 Boa               |

## B.6 Poços Campo Gaia

| Poço | $D_{bh}$<br>[m] | $D_{toc}$<br>[m] | $L$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\rho$<br>[lbm/gal] | $V_t$<br>[bbl] | $V_p$<br>[bbl] | $P_c$<br>[psi] |
|------|-----------------|------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| G-01 | 5644            | 5044             | 600        | 654          | 15,6                | 110            | 0              | 1591           |
| G-02 | 5835            | 5135             | 700        | 800          | 15,6                | 128            | 0              | 1856           |
| G-03 | 5648            | 4948             | 700        | 820          | 15,8                | 128            | 0              | 1880           |
| G-04 | 5859            | 5259             | 600        | 500          | 15,8                | 110            | 0              | 1612           |
| G-05 | 5207            | 4553             | 654        | 313          | 16,2                | 120            | 20             | 1800           |
| G-06 | 5180            | 4620             | 560        | 307          | 15,8                | 102            | 435            | 1504           |
| G-07 | 5845            | 5245             | 600        | 600          | 16,2                | 110            | 31             | 1652           |
| G-08 | 6030            | 5450             | 580        | 790          | 15,8                | 106            | 130            | 1557           |
| G-09 | 5830            | 4990             | 840        | 918          | 15,8                | 154            | 574            | 2256           |
| G-10 | 5300            | 5100             | 200        | 236          | 16,0                | 39             | 200            | 544            |
| G-11 | 5760            | 5115             | 645        | 846          | 15,8                | 118            | 26             | 1732           |

| Poço | $\rho_l$<br>[lbm/gal] | $V_l$<br>[bbl] | $P_l$<br>[psi] | $\rho_{flush}$<br>[lbm/gal] | $V_{flush}$<br>[bbl] | $P_{flush}$<br>[psi] | $\rho_{spac}$<br>[lbm/gal] | $V_{spac}$<br>[bbl] | $P_{spac}$<br>[psi] |
|------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| G-01 | 9,9                   | 763            | 6654           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| G-02 | 9,9                   | 770            | 6712           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| G-03 | 9,9                   | 725            | 6326           | 9,9                         | 100                  | 920                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| G-04 | 9,9                   | 807            | 7041           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 105                 | 1239                |
| G-05 | 9,9                   | 653            | 5696           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 120                 | 1416                |
| G-06 | 9,9                   | 685            | 5977           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| G-07 | 9,9                   | 800            | 6975           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 100                 | 1180                |
| G-08 | 9,7                   | 837            | 7155           | 9,9                         | 80                   | 736                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| G-09 | 9,9                   | 773            | 6743           | 9,9                         | 60                   | 552                  | 12,7                       | 80                  | 944                 |
| G-10 | 9,9                   | 814            | 7101           | 9,9                         | 60                   | 523                  | 12,7                       | 110                 | 1231                |
| G-11 | 9,8                   | 796            | 6872           | 9,9                         | 50                   | 460                  | 12,7                       | 90                  | 1062                |

## B.6 Poços Campo Gaia

| Poço | $\Delta P_c$<br>[psi] | $\Delta P_l$<br>[psi] | $P_{bh}$<br>[psi] | $P_{toc}$<br>[psi] | $Q_b$<br>[bbl/<br>min] | $Q_e$<br>[bbl/<br>min] | $\dot{W}_{bh}$<br>[hp] | $\dot{W}_d$<br>[hp] | $\dot{W}_{toc}$<br>[hp] | $\Delta \dot{W}$<br>[hp] |
|------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| G-01 | 222                   | 67                    | 10245             | 8432               | 14,0                   | 14,0                   | 3500                   | 0                   | 2880                    | 619                      |
| G-02 | 247                   | 57                    | 10731             | 8628               | 12,0                   | 12,0                   | 3142                   | 0                   | 2526                    | 616                      |
| G-03 | 259                   | 78                    | 10383             | 8244               | 14,0                   | 14,0                   | 3547                   | 0                   | 2816                    | 731                      |
| G-04 | 222                   | 67                    | 10619             | 8786               | 14,0                   | 14,0                   | 3628                   | 0                   | 3001                    | 626                      |
| G-05 | 242                   | 73                    | 9756              | 7714               | 14,0                   | 12,0                   | 3333                   | 378                 | 2258                    | 597                      |
| G-06 | 198                   | 46                    | 9443              | 7741               | 12,0                   | 2,3                    | 2765                   | 1834                | 432                     | 95                       |
| G-07 | 222                   | 67                    | 10627             | 8753               | 14,0                   | 10,9                   | 3630                   | 658                 | 2332                    | 499                      |
| G-08 | 214                   | 63                    | 10650             | 8879               | 14,0                   | 6,3                    | 3638                   | 1670                | 1363                    | 272                      |
| G-09 | 310                   | 94                    | 10870             | 8304               | 14,0                   | 3,0                    | 3713                   | 2237                | 599                     | 185                      |
| G-10 | 39                    | 22                    | 9280              | 8697               | 14,0                   | 2,3                    | 3170                   | 2490                | 481                     | 32                       |
| G-11 | 233                   | 61                    | 10401             | 8436               | 13,0                   | 10,7                   | 3299                   | 483                 | 2193                    | 511                      |

| Poço | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $CDC$ | $CE$ | $IQC$ | <i>Aval. Perfil</i> |
|------|----------|----------|-------|------|-------|---------------------|
| G-01 | 1,03     | 1,07     | 0,96  | 0,92 | 0,88  | 3 Média             |
| G-02 | 0,88     | 0,90     | 0,97  | 0,88 | 0,85  | 2 Boa               |
| G-03 | 1,04     | 1,08     | 0,96  | 0,85 | 0,82  | 1 Excelente         |
| G-04 | 1,04     | 1,08     | 0,96  | 1,20 | 1,00  | 2 Boa               |
| G-05 | 0,91     | 1,11     | 0,83  | 2,09 | 1,00  | 1 Excelente         |
| G-06 | 0,17     | 0,91     | 0,19  | 1,82 | 0,34  | 1 Excelente         |
| G-07 | 0,83     | 1,11     | 0,75  | 1,00 | 0,75  | 1 Excelente         |
| G-08 | 0,47     | 1,08     | 0,43  | 0,73 | 0,32  | 1 Excelente         |
| G-09 | 0,22     | 1,08     | 0,20  | 0,91 | 0,19  | 1 Excelente         |
| G-10 | 0,16     | 1,03     | 0,16  | 0,85 | 0,13  | 4 Ruim              |
| G-11 | 0,79     | 1,00     | 0,79  | 0,76 | 0,61  | 1 Excelente         |