



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
INSTITUTO DE QUÍMICA**

**ANA LUDMILLA CORREIA BOTELHO**

**SISTEMAS DE PASTAS DE CIMENTO COM FILTRADO ULTRA CONTROLADO  
PARA APLICAÇÃO EM POÇOS COM RISCOS DE MIGRAÇÃO DE GÁS**

**NATAL  
2021**

ANA LUDMILLA CORREIA BOTELHO

SISTEMAS DE PASTAS DE CIMENTO COM FILTRADO ULTRA CONTROLADO  
PARA APLICAÇÃO EM POÇOS COM RISCOS DE MIGRAÇÃO DE GÁS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em  
Química do Petróleo, da Universidade Federal do Rio  
Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Química do Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Cezar de Oliveira Freitas

Coorientador: Msc. Filipe Silva de Oliveira

NATAL

2021

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Francisco Gurgel De Azevedo - Instituto Química - IQ

Botelho, Ana Ludmilla Correia.

Sistemas de pastas de cimento com filtrado ultra controlado para aplicação em poços com riscos de migração de gás / Ana Ludmilla Correia Botelho. - Natal: UFRN, 2021.  
40f.: il.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra - CCET, Instituto de Química. Curso de Química do Petróleo Bacharelado.

Orientador: Dr. Júlio Cezar de Oliveira Freitas.

Coorientador: Msc. Filipe Silva de Oliveira.

1. Química do Petróleo - Monografia. 2. Pastas de cimento - Monografia. 3. Látex - Monografia. 4. Migração de gás - Monografia. 5. Cimentação de poços - Monografia. 6. Ultra controlado - Monografia. I. Freitas, Júlio Cezar de Oliveira. II. Oliveira, Filipe Silva de. III. Título.

RN/UF/BSIQ

CDU 54:622.323

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por proporcionar este momento.

À minha família, que sempre me motivou e me ajudou. Em especial minha mãe (Renata), meu pai (Alexandre) e meu irmão (Paulo), por sempre estarem do meu lado nos momentos difíceis.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram.

Aos meus colegas de turma que sempre me ajudaram no decorrer da graduação.

Ao meu orientador, Prof. Júlio Cezar de Oliveira Freitas, por abrir as portas do Núcleo Tecnológico em Cimentação de Poços de Petróleo – NTCPP, pelas orientações e por acreditar no meu potencial.

Ao meu coorientador, Msc. Filipe Silva de Oliveira pelos primeiros conhecimentos sobre cimentação, pelos conhecimentos compartilhados e pelas críticas construtivas.

À Paulo Henrique pelos minicursos que enriqueceram meu conhecimento para a realização desse trabalho.

À toda a família LabCim: Bruno, Fabrício, Adriano, Dona Silvia, Carlos Arthur, Carlos Augusto, Letícia, Nathâni, Danilo e Mailon.

Ao LabCim por toda a estrutura e apoio para a realização da pesquisa.

À UFRN, pela oportunidade de me graduar em uma instituição de ensino de excelência.

"Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer."

Mahatma Gandhi

## RESUMO

Em um processo de cimentação de poços de petróleo, devemos considerar vários fatores na formulação de uma pasta de cimento. Um dos fatores mais estudados é a migração de gás, porém, ainda existem dúvidas sobre suas causas, e como resolvê-las. A maioria dos problemas que envolvem a migração de gás podem ir de uma simples remediação (que tem um elevado custo), até um *blowout*, podendo ocasionar danos irreparáveis, como no caso do acidente no campo da “*Deepwater Horizon*”, em 2010, no golfo do México. Diante desses acidentes, pesquisadores vem constantemente desenvolvendo novas tecnologias para evitar a migração de gás, como por exemplo, a adição de controladores de filtrado, onde eles perceberam que aumentava a viscosidade da pasta, ajudando no controle da migração de gás. De acordo com o cenário descrito acima, neste projeto utilizamos o controlador de filtrado juntamente com o látex SBR para controlar a migração de gás. Como os dois aditivos influenciam no aumento da viscosidade da pasta, adicionamos dispersante para não ocorrer nenhum problema no bombeio da pasta ou na sua desidratação. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver sistemas de pastas de cimento com filtrado ultra controlado, para aplicação em poços com riscos de migração de gás. Fixamos a concentração do controlador de filtrado e variamos a concentração do látex e do dispersante. Com o aumento da concentração do látex observou-se uma diminuição do volume perdido por filtração e, conseqüentemente, um aumento no controle do gás. No entanto, a partir da concentração 1,5 gpc, o látex formou um sólido que impossibilitou a adição do cimento, e a respectiva realização dos testes de reologia e filtrado. Esse incremento na viscosidade se deve ao fato de que as partículas de látex se entrelaçam, bem como formam um filme polimérico que tampona os canais e restringe a percolação de água e/ou de gás. Diante dos resultados e da literatura, podemos inferir que o látex tem capacidade de ser um agente ultra controlador de filtrado, mas para isso, é necessário o ajuste das formulações, pois, de acordo com a literatura, um ultra controlador de filtrado deve alcançar valores de filtrado API menor ou igual a 25 mL/30 min.

**Palavras-chave:** Pastas de cimento; Látex; Migração de gás; Cimentação de poços; Ultra controlado.

## ABSTRACT

In a process of cementing oil wells, we must consider several factors in the formulation of a cement slurry. One of the most studied factors is the migration of gas, however, there are still doubts about its causes, and how to solve them. Most of the problems involving gas migration can range from simple remediation (which has a high cost) to a blowout, which can cause irreparable damage, as in the case of the accident at the “Deepwater Horizon” field in 2010 in the Gulf of Mexico. Faced with these accidents, researchers are constantly developing new technologies to prevent gas migration, such as the addition of fluid loss controllers, where they realized that the slurry’s viscosity increased, helping to control gas migration. According to the scenario described above, in this project we use the fluid loss controller together with the SBR latex to control gas migration. As the two additives influence the increase in the viscosity of the slurry, we added dispersant so that there is no problem in the pumping of the slurry or in its dehydration. Thus, this work aims to develop cement slurry systems with ultra-controlled filtrate, for application in wells with risks of gas migration. We fix the concentration of the fluid loss controller and vary the concentration of latex and dispersant. With the increase in the concentration of latex, there was a decrease in the volume lost by filtration and, consequently, an increase in gas control. However, after the 1.5 gpc concentration, the latex formed a solid that made it impossible to add the cement, and to carry out the rheology and filtrate tests. This increase in viscosity is due to the fact that the latex particles are intertwined, as well as forming a polymeric film that buffer the channels and restrict the percolation of water and/or gas. In view of the results and the literature, we can infer that the latex has the capacity to be an ultra-controlled fluid loss agent, but for that, it is necessary to adjust the formulations, because, according to the literature, an ultra-controlled fluid loss agent must reach values of API filtrate less than or equal to 25 mL/30 min.

**Keywords:** Cement slurries; Latex; Gas migration; Well cementing; Ultra-controlled.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>III</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>13</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
3.1. CIMENTO PORTLAND .....	14
3.1.1. <b>Conceito .....</b>	<b>14</b>
3.1.2. <b>Composição Química.....</b>	<b>14</b>
3.1.3. <b>Classificação dos cimentos .....</b>	<b>15</b>
3.2. CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO .....	16
3.3. CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA.....	17
3.4. FATORES QUE AFETAM A CIMENTAÇÃO.....	17
3.5. MIGRAÇÃO DE GÁS.....	18
3.6. ADITIVOS PARA CIMENTAÇÃO.....	22
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
4.1. CÁLCULOS E FORMULAÇÕES DAS PASTAS CIMENTANTES .....	27
4.2. ENSAIOS TECNOLÓGICOS API.....	28
4.2.1. <b>Mistura e homogeneização das pastas formuladas.....</b>	<b>28</b>
4.2.2. <b>Propriedades reológicas .....</b>	<b>29</b>
4.2.3. <b>Determinação do volume de perda de fluido .....</b>	<b>29</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>31</b>
5.1. ANÁLISE DE MISTURA .....	31
5.2. PROPRIEDADES REOLÓGICAS.....	33
5.3. VOLUME DE PERDA DE FLUIDO .....	35
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>



**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Acidente no campo produtor de “Deepwater Horizon”, Estados Unidos (2010). ....	11
Figura 2 - Cimentação nos anos de 1920.....	16
Figura 3 - Principais causas da migração de gás anular. ....	19
Figura 4 - Tipos de migração de gás.....	20
Figura 5 - (a) Início da hidratação da pasta e conseqüente redução da pressão hidrostática. (b) Pressão de poros do cimento se iguala a pressão de poros da formação e a migração de gás tem início. (c) O gás invade o anular e migra.....	21
Figura 6 - Processo de redução de pressão hidrostática durante a pega do cimento. ....	21
Figura 7 - Potenciais caminhos de vazamento: (a) e (b) entre o cimento e revestimento, (c) através do cimento, (d) através do revestimento, (e) fraturas, e (f) entre o cimento e a formação.....	22
Figura 8 - Estrutura do látex estireno-butadieno (SBR).....	25
Figura 9 - Fluxograma da metodologia empregada.....	27
Figura 10 - Resultados dos testes de mistura.....	31
Figura 11 - Resultados de Viscosidade Plástica. ....	33
Figura 12 - Resultados de Limite de Escoamento. ....	33
Figura 13 - Efeito provocado pelo entrelaçamento do polímero. ....	34
Figura 14 - Resultados dos ensaios de perda de fluido.....	35
Figura 15 - Esquema do mecanismo de formação do filme de látex.....	36

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição mineralógica do clínquer de cimento Portland convencional. ....	14
Tabela 2 - Classificações do cimento Portland.....	15
Tabela 3 - Materiais utilizados. ....	26
Tabela 4 - Composição das pastas formuladas (L/m <sup>3</sup> e gpc – galão por pé cúbico de cimento ou wt% - % em relação à massa do cimento). ....	28

## 1. INTRODUÇÃO

A cimentação, primária ou secundária, de poços de petróleo tem como função básica a estabilidade mecânica e o isolamento zonal de um poço durante toda a vida útil dele. Os cimentos utilizados nas operações de cimentação de poços petrolíferos, de acordo com a *American Petroleum Institute* (API), são classificados pelas letras de “A” à “J”, e a diferença entre estas classes está diretamente relacionada com a composição química do clínquer, que deve estar adequada às condições de uso pela distribuição relativa das fases, profundidade e temperatura de cada poço (NELSON; GUILLOT, 2006).

A qualidade da cimentação primária é fundamental para o ciclo de vida de um poço, razão pela qual qualquer problema no isolamento irá requerer uma operação de correção da cimentação primária, representando um custo adicional no processo de construção de um poço. Pensando nisso, são considerados alguns cuidados no projeto de obtenção de uma pasta de cimento para que esta atenda aos requisitos necessários para sua utilização. Os fatores que influenciam a cimentação devem ser levados em consideração para a obtenção de uma pasta de cimento com composição adequada. Na maioria dos casos, é necessária a adição de produtos químicos à pasta para modificar suas propriedades, de acordo com as condições do poço ou da operação, e, assim, obter composições capazes de se deslocar no interior do revestimento, promovendo um bom deslocamento até a zona de interesse. Atualmente existe uma gama de aditivos fornecidos por empresas multinacionais, tanto na forma líquida, quanto na sólida (FREITAS, 2008).

A pasta de cimento a ser utilizada em cada seção de um poço depende de muitos fatores operacionais e locais. Em muitos casos, a escolha de densidade das pastas é indicada por fatores que estão além das simples pressões de poro e fratura. Frequentemente, cimentos são misturados produzindo pastas de elevadas densidades para alcançar altos valores de resistência à compressão em um curto intervalo de tempo. Por outro lado, por razões econômicas, verificam-se casos em que são utilizadas pastas de baixa densidade por promoverem maior rendimento de cimento por saco (MARINHO, 2004; NELSON; GUILLOT, 2006).

Pastas cimentantes constituídas apenas de cimento e água têm se mostrado ineficientes, devido a sua natureza frágil. Por isso, têm sido estudadas novas formulações de pastas de cimento aditivadas com materiais poliméricos com características flexíveis (MARINHO, 2004; SANTOS JUNIOR, 2006; SILVA; ROMAN; GLEIZE, 2004).

A migração de gás é um dos maiores problemas na cimentação de um poço de petróleo. Sem um projeto adequado da pasta cimentante, poderão ocorrer problemas graves, como, por exemplo, o acidente que aconteceu em 20 de abril de 2010, no campo produtor de “*Deepwater Horizon*”, localizado no golfo do México, costa do estado da Louisiana, nos Estados Unidos. Foi o maior acidente envolvendo derramamento de óleo no mar, alcançando marcas superiores a 4,9 milhões de barris de petróleo, o que equivale a uma mancha de óleo de aproximadamente 75 quilômetros quadrados. As causas do acidente foram atribuídas a uma série de erros, que abrangeram o projeto, a operação e a execução, bem como falhas humanas no sistema de prevenção.

Figura 1 - Acidente no campo produtor de “*Deepwater Horizon*”, Estados Unidos (2010).



Fonte: (BBC NEWS, 2010).

O relatório final apresentado pela *Bureau of Ocean Energy Management (BOEM)*, intitulado: “*REVIEW OF OPERATIONAL DATA PRECEDING EXPLOSION ON DEEPWATER HORIZON IN MC252 – FINAL REPORT*”, em sua página 15, afirma que três falhas principais nas barreiras de fluxo de formação foram evidenciadas. Estas falhas resultaram em perda do controle do poço e, subsequentemente, na sua erupção, também chamada de *Blowout*. Uma destas falhas principais foi relacionada à qualidade da cimentação primária da zona produtora de gás, que permitiu a migração dos fluidos até a superfície, o que desencadeou toda a catástrofe.

Considerando esses tipos de acidentes, pesquisadores vem buscando, cada vez mais, novas tecnologias para evitar a migração de gás, entre eles o uso de controlador de

filtrado. Neste trabalho consideramos o látex SBR junto com outro controlador de filtrado para obtermos uma pasta de cimento com ação ultra controladora para combater a migração de gás. No entanto, sabemos que o controlador de filtrado influencia no aumento da viscosidade da pasta, então adicionamos dispersante à formulação para possibilitar o bombeio no processo de cimentação no campo produtor.

## **2. OBJETIVO**

Este projeto tem como objetivo desenvolver sistemas de pastas de cimento com filtrado ultra controlado para aplicação em poços com riscos de migração de gás.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. CIMENTO PORTLAND

##### 3.1.1. Conceito

O cimento é um pó finamente triturado que, quando misturado com água, passa a ter uma massa dura. Por causa de suas propriedades hidratantes, os cimentos construtivos, que até endurecem sob a água, são denominados cimentos hidráulicos. O mais importante deles é o cimento Portland (MASON; LEA, 2020).

Esses cimentos fixam e desenvolvem resistência à compressão como resultado da hidratação, envolvendo reações químicas entre a água e os compostos presentes no cimento. O desenvolvimento da força é previsível, uniforme e relativamente rápido. O cimento fixo também tem baixa permeabilidade e é quase insolúvel em água; portanto, a exposição à água não destrói o material endurecido (NELSON; GUILLOT, 2006).

##### 3.1.2. Composição Química

As propriedades do cimento Portland são determinadas pela composição mineralógica do clínquer. A composição mineralógica do clínquer de cimento Portland convencional é mostrada na Tabela 1. Para cimentos especiais, o conteúdo de  $C_3A$  e  $C_4AF$  pode diferir significativamente (NELSON; GUILLOT, 2006).

Tabela 1 - Composição mineralógica do clínquer de cimento Portland convencional.

Composição de óxido	Notação de cimento	Nome comum	Concentração (wt%)
$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$	Alita	55-65
$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$	Belita	15-25
$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$	Aluminato	8-14
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$	Fase ferrita	8-12

Fonte: Adaptada de (NELSON; GUILLOT, 2006), página 24.

### 3.1.3. Classificação dos cimentos

Os cimentos Portland são fabricados para atender a certos padrões químicos e físicos que dependem de sua aplicação. Para promover a consistência do desempenho entre os fabricantes de cimento, sistemas e especificações de classificação foram estabelecidos por vários grupos de usuários. Os sistemas mais conhecidos são os da ASTM International (ASTM C 150, Especificação Padrão para Cimento Portland) e API (API Spec 10A, Especificação para Cimentos e Materiais para Cimentação de Poços). O esquema de classificação API foi adotado pela ISO como padrão 10426-1, Indústrias de Petróleo e Gás Natural – Cimentos e materiais para cimentação de poços – Parte 1: Especificação.

A tabela abaixo apresenta as classificações do cimento Portland com a típica composição potencial das fases do cimento em wt%.

Tabela 2 - Classificações do cimento Portland.

<b>Classe API</b>	<b>C<sub>3</sub>S (wt%)</b>	<b>β-C<sub>2</sub>S (wt%)</b>	<b>C<sub>3</sub>A (wt%)</b>	<b>C<sub>4</sub>AF (wt%)</b>
A	45	27	11	8
B	44	31	5	13
C	53	19	11	9
D	28	49	4	12
E	38	43	4	9
G	50	30	5	12
H	50	30	5	12

Fonte: Adaptada de (NELSON; GUILLOT, 2006), página 47.



### 3.2. CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

O primeiro poço de petróleo foi perfurado em 1859, mas só no ano de 1903 é que foi cimentado o primeiro poço, no Campo *Lompoc*, na Califórnia. Nessa primeira operação de cimentação, foram bombeados cinquenta sacos de cimento com objetivo de evitar o influxo de água da formação para o poço. Naquela época, esperavam-se vinte e oito dias para o endurecimento do cimento.

Em 1910, Almond Perkins desenvolveu uma patente que consistia na realização de uma operação de cimentação com dois tampões, isto é, a pasta era bombeada para o poço, com tampões metálicos à frente e atrás desta, para evitar a sua contaminação durante seu deslocamento por água ou fluido de perfuração.

Depois de algum tempo trabalhando com Perkins, em 1919, Erle Halliburton parte para o “*MidContinent*”, onde fundou sua própria empresa, a Halliburton Cementing Co., que se tornou, por sua vez, a maior empresa desta especialidade. Em 1922, Halliburton patenteou o misturador com jatos *jet mixer* automatizando a mistura de pasta, ampliando, assim, as possibilidades operacionais, fazendo com que a prática de cimentar os revestimentos fosse adotada pela maioria das companhias. Nesta época, aguardava-se de 7 a 28 dias para o endurecimento do cimento (HALLIBURTON COMPANY, 1998).

Figura 2 - Cimentação nos anos de 1920.



Fonte: (SMITH, 1990).

A partir de 1923, os fabricantes de cimento, americanos e europeus, passaram a fabricar cimentos especiais para a indústria de petróleo, com alta resistência inicial. Com o advento dos aditivos químicos, o tempo de pega foi sendo paulatinamente reduzido (72

horas até 1946; e 24 a 26 horas a partir de 1946), e outras propriedades da pasta de cimento foram controladas.

Em 1930 os poços eram cimentados com sacos de cimento e poucos aditivos. Em 1940, existiam dois tipos de cimentos e três aditivos foram desenvolvidos. Alguns anos depois, em 1965, foram criadas 8 classes de cimento API e 38 aditivos foram postos no mercado. Em 1985, embora o número de classes de cimento API tenha sido reduzido para quatro, o número de aditivos aumentou para 50. Atualmente, existem mais de 100 tipos de aditivos sólidos ou líquidos disponíveis nas companhias de serviço (NELSON; GUILLOT, 2006).

### 3.3. CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA

A cimentação primária é de grande importância para a construção de qualquer poço de petróleo, pois, uma cimentação mal elaborada reduz o ciclo de vida do poço, e implica em custos adicionais na sua construção. Tem como função básica garantir a estabilidade mecânica e o isolamento zonal de um poço, durante toda a vida útil dele.

Na cimentação, a pasta de cimento é posicionada no espaço anular entre a parede do poço e o revestimento descido em cada fase da perfuração, cujos principais objetivos são isolar a formação rochosa e suportar o peso dos revestimentos utilizados. No revestimento condutor, a pasta tem a função de impedir a circulação de fluidos de perfuração e uma possível corrosão do aço. No de superfície, tem a função de proteger horizontes superficiais da água, suportar equipamentos e colunas a serem descidos posteriormente. No intermediário, isolar e/ou proteger formações geomecanicamente instáveis, portadoras de fluidos corrosivos, com pressão anormal e/ou perda de circulação. Já no revestimento de produção, o objetivo da pasta de cimento é promover a vedação hidráulica eficiente e permanente entre os diversos intervalos produtores, impedindo a migração de fluidos (PETRÓLEO BRASILEIRO S. A., 2002).

### 3.4. FATORES QUE AFETAM A CIMENTAÇÃO

Como a cimentação primária consiste no posicionamento de uma pasta cimentante no anular formado pelo revestimento e as paredes do poço, espera-se que a mesma, após a pega, proporcione:

- Isolamento das formações;
- Aderência mecânica ao revestimento;
- Proteção do revestimento contra corrosão e cargas dinâmicas decorrentes de operações no seu interior.

Para que a pasta de cimento atenda aos requisitos mencionados acima, é necessário que alguns cuidados no projeto e na execução da cimentação primária sejam tomados. Os fatores listados abaixo são, reconhecidamente, responsáveis pelas deficiências na capacidade de um selante, embora estas deficiências não se limitem apenas a estes fatores:

- Contração volumétrica apreciável, devido ao processo de hidratação e fissuração da bainha de cimento sob tensão, gerando fraturas e micro anulares que permitem a migração de fluidos;
- Fluido de perfuração e reboco com propriedades inadequadas, permitindo o fluxo de gás ascendente no anular;
- Perda de filtrado excessiva, permitindo a entrada do gás na coluna da pasta;
- Densidade incorreta da pasta, podendo resultar no desbalanceamento hidrostático e entrada de fluidos na pasta;
- Pastas altamente permeáveis, contribuindo para deficiências no isolamento hidráulico e resistência ao fluxo de gás; e,
- Gelificação prematura, resultando na perda do controle da pressão hidrostática.

### 3.5. MIGRAÇÃO DE GÁS

Problemas de cimentação podem estar relacionados ao deslocamento da pasta de perfuração e das pastas de cimento. Estes fluidos têm comportamento não newtoniano e, como tais, necessitam de uma pressão diferencial para fluir. A eficiência do deslocamento está relacionada ao modelo de fluxo, mas também depende de condições mecânicas do poço (MARTINEZ; MACDONALD, 1980; VUK *et al.*, 2000).

Defeitos de cimentação se manifestam através dos canais em torno do revestimento no espaço anular. Falhas de cimentação podem resultar problemas de segurança ambiental e problemas econômicos em produção de petróleo *offshore*. A migração de gás pelo anular não é um problema inerente apenas a revestimentos posicionados em pequenas profundidades, mas também em operações que envolvam a utilização de colunas de trabalho ou de produção em poços perfurados em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). Porém, o maior risco, de fato, é a migração de gás através do revestimento condutor ou revestimento de superfície porque, devido à pouca profundidade, o gás pode atingir a superfície dentro de poucas horas (BONETT; PAFITIS, 1996). Intervenções para interromper o fluxo de gás pelo anular são difíceis de serem implantadas, por isso evitar que ela aconteça é a melhor maneira de promover a segurança e proteger o ambiente (MARTINEZ; MACDONALD, 1980).

A migração de gás é um fenômeno onde o gás presente nos poros da formação infiltra-se na matriz do cimento, onde a incorporação destes gases pode levar à perda do controle das pressões de fundo de poço, ou em casos mais avançados, criar canais de comunicação da zona produtora com a superfície. No entanto três causas principais devem ser atendidas para que a migração anular de gás ocorra: a pressão do poço deve ser menor ou igual a pressão da formação para que o gás possa migrar, bem como é preciso que haja uma comunicação para o gás migrar e um lugar para ele entrar. Ou seja, sem essas três causas, não tem como ocorrer a migração do gás.

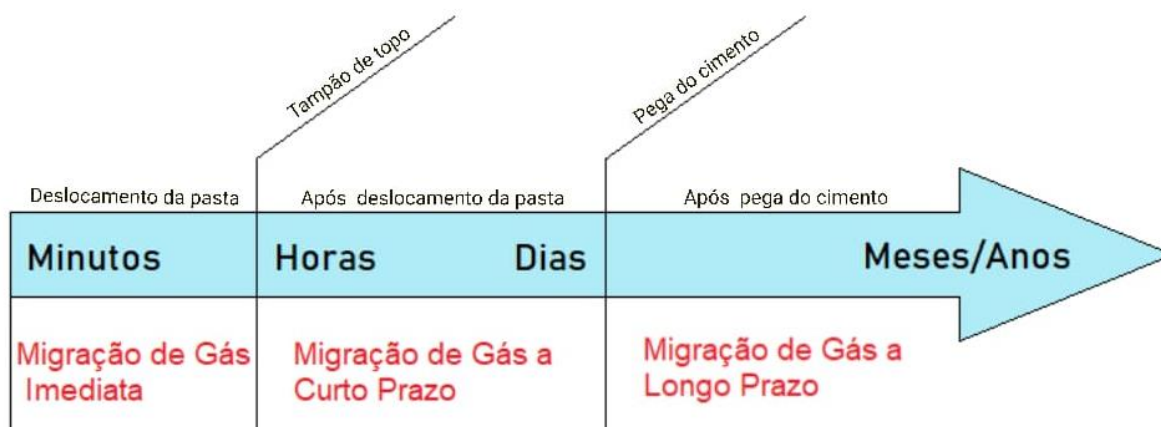
Figura 3 - Principais causas da migração de gás anular.



Adaptado de (NELSON; GUILLOT, 2006), página 290.

Durante a operação de cimentação, a migração de gás foi dividida em três tipos: imediata, de curto prazo e de longo prazo, quanto ao momento da sua ocorrência (NELSON; GUILLOT, 2006). A migração de gás imediata ocorre durante o deslocamento da pasta de cimento, tendo como principal causa o desbalanceamento entre a pressão hidrostática e a pressão do gás de formação. A migração de gás de curto prazo ocorre na etapa de transição da pega da pasta, etapa na qual o cimento está em conversão de estado fluido para o estado sólido. Durante essa transição volumétrica natural do cimento, ocorre uma perda de pressão hidrostática podendo provocar influxo de gases. Já a migração de longo prazo se manifesta após a cura do cimento, e está relacionada a permeabilidade e porosidade da matriz cimentícia, a aderência do cimento nas interfaces cimento/formação e cimento/revestimento, e também por microfissuras ocasionadas pelas forças compressivas que atuam sobre a bainha de cimento (NELSON; GUILLOT, 2006).

Figura 4 - Tipos de migração de gás.



Adaptado de (NELSON; GUILLOT, 2006), página 291.

O processo de endurecimento da pasta de cimento consiste na gelificação inicial, hidratação e pega da pasta. Durante a gelificação e hidratação, o cimento perde a pressão hidrostática e, num dado momento, pode se igualar com a pressão dos poros, nesse momento pode ocorrer a migração do gás até que o cimento endureça, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - (a) Início da hidratação da pasta e consequente redução da pressão hidrostática. (b) Pressão de poros do cimento se iguala a pressão de poros da formação e a migração de gás tem início. (c) O gás invade o anular e migra.

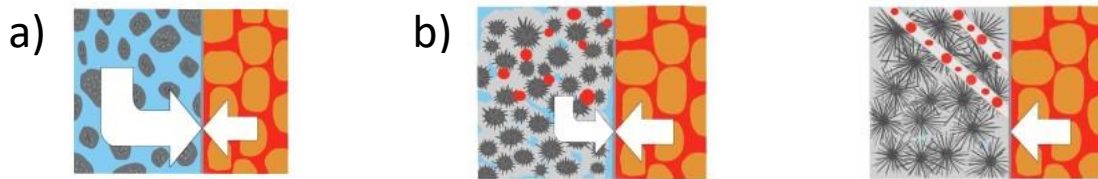
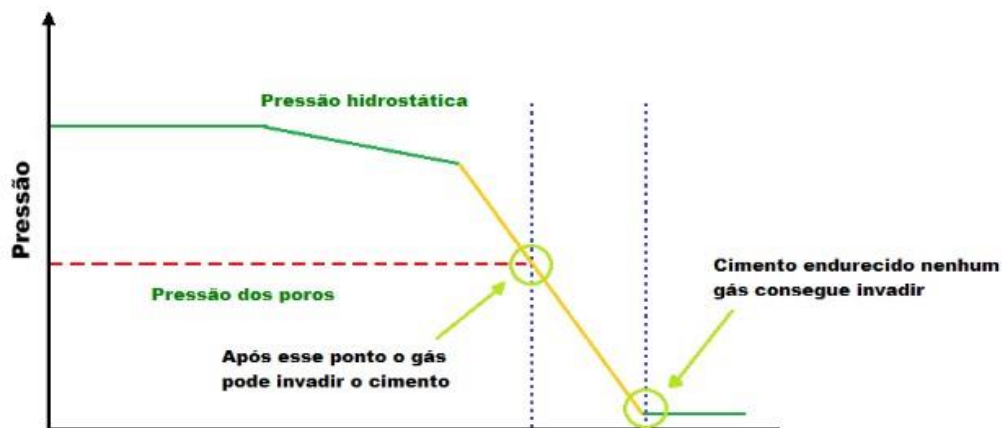


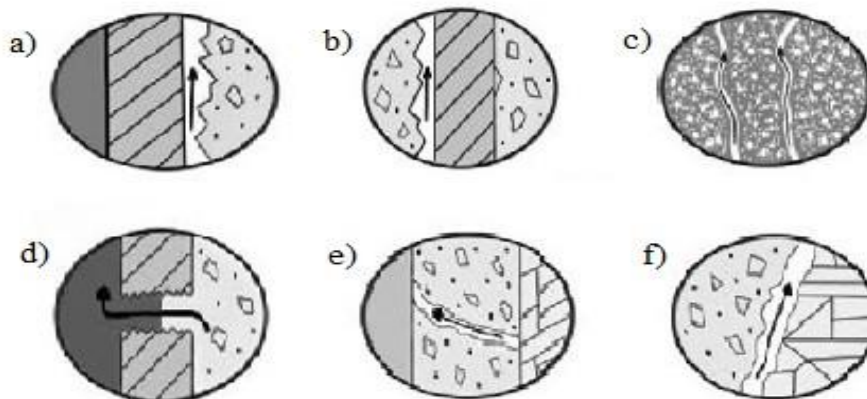
Figura 6 - Processo de redução de pressão hidrostática durante a pega do cimento.



Durante a migração, o gás pode passar de uma formação para outra, ou até mesmo ir para a superfície. Os principais fatores que afetam a migração são: desenvolvimento de força gel estática, perda de filtrado, retração do cimento, permeabilidade, água livre, remoção do fluido de perfuração, canal microanular e falha mecânica no cimento (NELSON; GUILLOT, 2006).

As possíveis maneiras de infiltração existentes no interior da bainha cimentante são mostradas esquematicamente (Figura 7), e incluem possíveis caminhos preferenciais do fluxo na interface rocha-cimento, na interface revestimento-cimento, e através dos materiais degradados. Considerando que o cimento utilizado para cimentação de poços de petróleo tem a permeabilidade muito baixa, nenhum fluxo significativo de fluidos pode ocorrer a menos que haja caminhos preferenciais do fluxo, ou o cimento tenha se degradado, ou o cimento não tenha sido corretamente processado na cimentação.

Figura 7 - Potenciais caminhos de vazamento: (a) e (b) entre o cimento e revestimento, (c) através do cimento, (d) através do revestimento, (e) fraturas, e (f) entre o cimento e a formação.



Fonte: Adaptado de (CELIA; BACHU, 2003).

### 3.6. ADITIVOS PARA CIMENTAÇÃO

As operações de cimentação dificilmente são realizadas com pastas preparadas apenas com cimento e água. Várias propriedades devem ser corrigidas para se bombear a pasta para o interior do poço. A indústria do petróleo, a exemplo da indústria da construção civil, emprega vários tipos de aditivos que buscam otimizar determinadas características em função do tipo de pasta, das condições de bombeio e até das características da formação local.

A norma DD ENV 197-1 (1995) da *British Standards Institution*, define aditivo como sendo compostos adicionados para promover as condições de fabricação e propriedades do cimento. Esta norma estabelece um máximo de 1,0 % em relação à massa do cimento, como limite para que um composto possa ser considerado como aditivo. Já a norma ASTM C 219 (1994) não utiliza a expressão aditivo e prefere o termo adição (que é definido pela norma ASTM C 125(1992)), embora com o mesmo significado de aditivo e sem a imposição de um valor limite. No Brasil não existem limites estabelecidos pela norma NBR 11768 (1992) para aditivos e/ou adições. Esta norma se restringe apenas à definição, classificação por tipos e nomenclatura dos aditivos. Assim, segundo a NBR 11768 (1992), aditivos são produtos que, quando adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.

Especificamente para a indústria da cimentação de poços de petróleo, uma classificação apresentada por NELSON *et al* (2006), resume a oito tipos de aditivos:

- Aceleradores de pega;
- Retardadores de pega;
- Estendedores;
- Adensantes;
- Dispersantes;
- Agentes de controle de perda de filtrado;
- Agentes de controle de perda de circulação; e,
- Aditivos especiais.

Os aditivos utilizados nesse estudo são: antiespumante, dispersante, controlador de filtrado e látex.

Antiespumantes são substâncias utilizadas para remover a espuma formada durante a mistura dos aditivos com o cimento. No entanto, os antiespumantes normalmente não removem todo o ar arrastado na pasta. A formação de espuma excessiva causa cavitação da bomba, e perda da cabeça de sucção durante a cimentação, impossibilitando os cálculos do volume da pasta na banheira de mistura. Isso pode resultar em uma pasta de densidade mais alta do que a necessária para a operação de cimentação particular. A principal causa da formação de espuma é o emprego de aditivos em pastas de cimento como os sais de ácidos orgânicos. Os antiespumantes reduzem a tensão superficial e precisam ser insolúveis em água para serem eficazes (BENSTED, 1996).

Dispersantes são substâncias que melhoram as propriedades de fluxo da pasta de cimento quebrando aglomerados de cimento e liberando a água, dando assim pastas de menor viscosidade e permitindo que condições de fluxo turbulento sejam alcançadas em pressões de bomba mais baixas (BENSTED, 1996). Adicionar mais dispersante pode ajudar a reduzir a perda de fluidez da pasta de cimento que pode ocorrer à medida que a desidratação progride; no entanto, a overdose pode resultar em sedimentação da pasta e desenvolvimento de água livre (NELSON; GUILLOT, 2006).

Controladores de filtrado são ingredientes essenciais nas formulações de pastas de cimento para evitar a migração de gás. Eles foram desenvolvidos inicialmente como



aditivos para permitir uma colocação uniforme do cimento através do invólucro, evitar a formação de pontes no reboco e manter a água dentro da pasta para obter uma hidratação ideal e desenvolvimento de resistência do cimento (NELSON; GUILLOT, 2006). Além desses benefícios, os controladores de filtrado podem funcionar para obstruir a porosidade dentro do cimento não consolidado e evitar a penetração de gás e sua migração (CHEUNG; BEIRUTE, 1985).

Os dois principais grupos de controladores de filtrado são: polímeros solúveis em água e materiais particulados. Os polímeros solúveis em água operam aumentando simultaneamente a viscosidade da fase aquosa e diminuindo a permeabilidade do reboco. Eles não promovem a formação de um reboco de cimento fino e impermeável. Em vez disso, eles simplesmente reduzem a taxa de engrossamento do reboco. Esse processo continua até que a pasta desidrate, deixando um reboco grosso.

Polímeros solúveis em água podem formar agregados coloidais fracamente ligados em solução que são suficientemente estáveis para ficarem presos na compressão do reboco. Esses polímeros também podem ser adsorvidos nas superfícies dos grãos de cimento e, assim, reduzir o tamanho dos poros. Mais provavelmente, uma superposição desses dois fenômenos, adsorção mais agregação, é o verdadeiro mecanismo de ação dos controladores de filtrado poliméricos (NELSON; GUILLOT, 2006). Alguns exemplos de polímeros solúveis em água são: carboximetilcelulose (CMC) e hidroxietilcelulose (HEC).

Já os materiais particulados atuam reduzindo a permeabilidade do reboco. Alguns exemplos são: bentonita e dispersões de polímeros (látex). As dispersões de polímero são definidas como dispersões coloidais estáveis que consistem em partículas de polímero com um diâmetro variando de 10 a 1000 nm em uma fase aquosa contínua que é geralmente referida como fase de soro. O polímero contém compostos solúveis em água, como co-mônômeros, oligômeros, surfactantes ou sais (DISTLER, 1998). São fluidos leitosos que apresentam coloração branca. Sua consistência pode variar de fluido a muito viscoso (WALTERS, 1988). Ele contém aproximadamente 45% de sólidos que fisicamente obstruem os poros do reboco do cimento, reduzindo o filtrado.

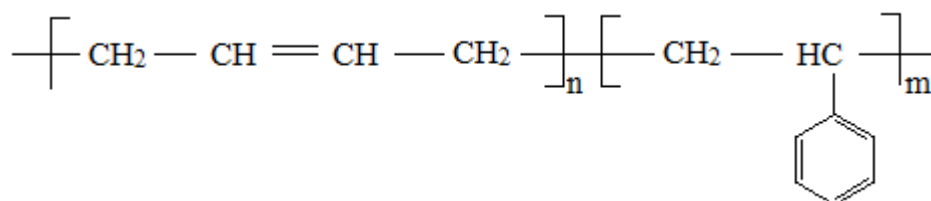
Originalmente o termo “látex” foi usado para designar o produto natural obtido da seringueira, no entanto, atualmente pode-se chamar de látex qualquer material polimérico em emulsão na água (BALLISTA, 2003).

Os látex são divididos em três tipos, de acordo com sua carga elétrica, que é determinada devido ao tipo de surfactante usado na dispersão. Os três tipos são: aniônicos

(negativamente carregados), catiônicos (positivamente carregados) e não-iônicos (sem carga elétrica) (WALTERS, 1987).

Um dos látex mais utilizados na indústria do petróleo é o látex estireno-butadieno (SBR). O látex SBR é uma dispersão aniônica de um copolímero de estireno-butadieno.

Figura 8 - Estrutura do látex estireno-butadieno (SBR).



Fonte: (AL-YAMI; RAMASAMY; WAGLE, 2017).

O látex e o cimento formam uma co-matriz que une os agregados. Esta co-matriz apresenta maior eficiência no preenchimento de microfissuras, em relação às misturas sem polímeros, resultando na maior resistência mecânica. Da mesma forma que a matriz de látex e cimento aumenta a aderência entre os agregados na mistura, ela também aumenta a aderência entre a mistura e demais substratos (WALTERS, 1988).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

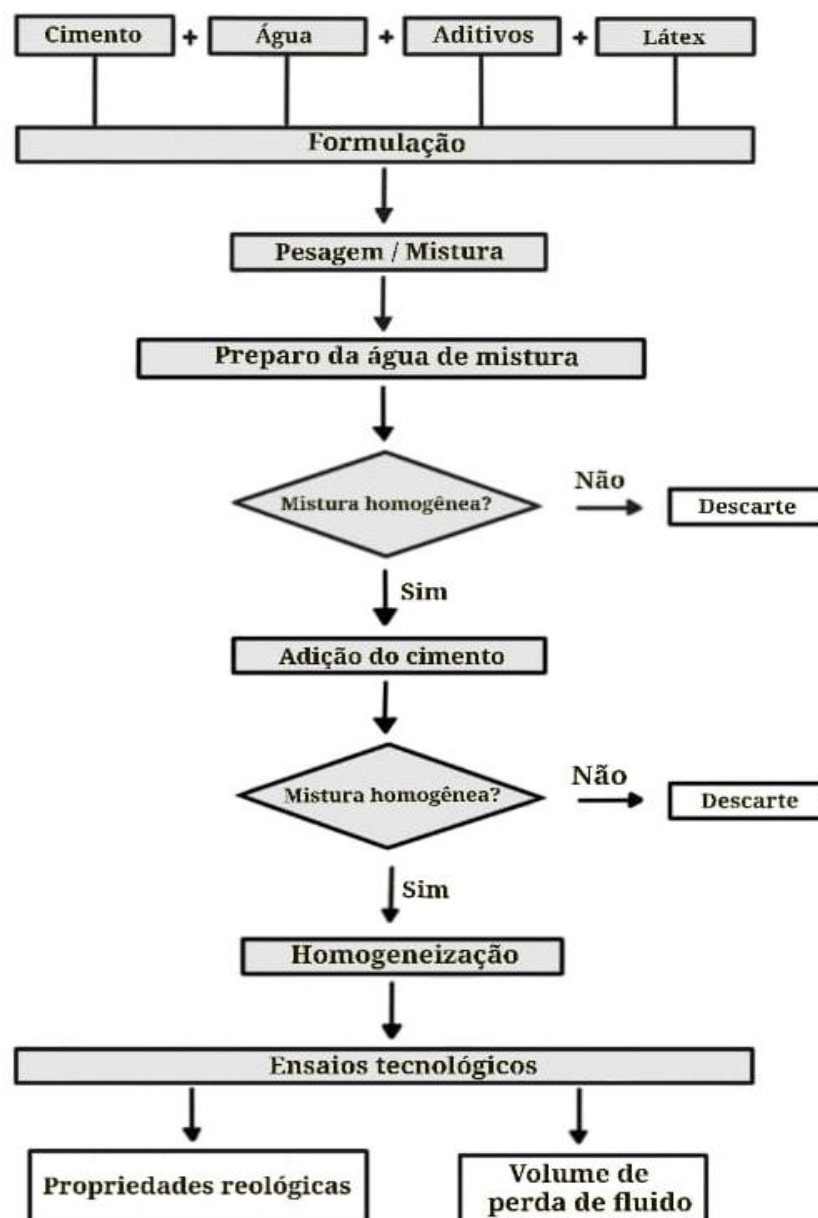
Os ensaios simularam as seguintes condições de um poço: profundidade de 1.700 m e gradiente geotérmico de 1,5°F/100 pés. Considerando essas condições, as temperaturas utilizadas para os ensaios foram: temperatura de circulação do poço (BHCT) de 115°F e temperatura estática do poço (BHST) de 164°F.

Para as formulações das pastas cimentantes compostas de cimento e água de mistura, foram utilizados os seguintes materiais:

Tabela 3 - Materiais utilizados.

<b>Material</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fornecedor</b>
Cimento	Cimento Portland classe G para poços de petróleo.	MIZU - Cimentos Especiais
Água	Água potável.	-----
Antiespumante	Aditivo antiespumante à base de silicone.	AGENA
Dispersante	Aditivo dispersante à base de lignosulfonato modificado.	BQMIL
Controlador de filtrado	Aditivo controlador de filtrado derivado de celulose.	BQMIL
Látex	Dispersão aniônica de um copolímero de butadieno-estireno, não carboxilado.	Nitriflex

Figura 9 - Fluxograma da metodologia empregada.



#### 4.1. CÁLCULOS E FORMULAÇÕES DAS PASTAS CIMENTANTES

Para obtenção dos valores de massas correspondentes a cada concentração de aditivo utilizado, o peso específico da pasta de cimento é fixado e se atribui as concentrações desejadas de aditivos sólidos ou líquidos. Todos esses cálculos são efetuados de acordo com a norma API RP 10B-2 (API, 2005).

As concentrações do látex e do dispersante foram variadas, enquanto a concentração dos demais aditivos permaneceu constante em todas as formulações

estudadas. Neste trabalho foram formuladas sete pastas, todas com peso específico de  $1,89 \text{ g/cm}^3$  ( $15,8 \text{ lb/gal}$ ), variando a concentração de látex de: 0 a  $401,28 \text{ L/m}^3$  ( $3,0 \text{ gpc}$  – galão por pé cúbico de cimento) e a concentração do dispersante de: 0 a  $13,37 \text{ L/m}^3$  ( $0,1 \text{ gpc}$ ). Os pontos mínimos e máximos desses aditivos, e as concentrações fixas dos outros (antiespumante e controlador de filtrado), foram inseridos no software *Statistica*, programa de estudo estatístico, que sorteou as combinações desses valores, gerando as formulações apresentadas na tabela 4.

As pastas foram calculadas para uma quantidade de componentes de modo a ser obtido 600 mL de pasta de cimento. Esta é a quantidade necessária para a realização dos ensaios de laboratório, segundo a API.

Todos os materiais utilizados na preparação das pastas foram pesados em uma balança digital *Tecnal Mark 3100* com resolução de 0,01g.

Tabela 4 - Composição das pastas formuladas ( $\text{L/m}^3$  e gpc – galão por pé cúbico de cimento ou wt% - % em relação à massa do cimento).

Composição		Formulações						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Antiespumante	( $\text{L/m}^3$ )	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01
	(gpc)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Dispersante	( $\text{L/m}^3$ )	6,68	6,68	6,68	6,68	13,37	10,70	2,67
	(gpc)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,08	0,02
Controlador de filtrado	(wt%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Látex	( $\text{L/m}^3$ )	0	401,28	334,40	200,64	200,64	66,88	66,88
	(gpc)	0	3,0	2,5	1,5	1,5	0,5	0,5

## 4.2. ENSAIOS TECNOLÓGICOS API

### 4.2.1. Mistura e homogeneização das pastas formuladas

As misturas das pastas foram realizadas em um misturador Chandler 30-60 seguindo a norma API RP 10B-2 de 2005. Imediatamente após a mistura das pastas, realiza-se a homogeneização das mesmas, em uma célula de um consistômetro

atmosférico Chandler 1200. O processo de homogeneização das pastas também foi realizado de acordo com a norma API RP 10B-2 de 2005 na temperatura de 115°F.

#### **4.2.2. Propriedades reológicas**

Depois de misturadas e homogeneizadas (API, 2005), as pastas são vertidas em copo térmico e cisalhadas em viscosímetro Chandler 3500, na temperatura de 115°F, aplicando-se várias taxas de cisalhamento, de acordo com a norma de ensaios reológicos definidas pela API. As leituras serão realizadas aplicando-se taxas de cisalhamento ascendentes e descendentes a intervalos de 10 s, mantendo-se a temperatura constante até o final do ensaio. As taxas empregadas são de 0,05 s<sup>-1</sup> (3 rpm); 0,10 s<sup>-1</sup> (6 rpm); 0,16 s<sup>-1</sup> (10 rpm); 0,33 s<sup>-1</sup> (20 rpm); 0,51 s<sup>-1</sup> (30 rpm); 1,10 s<sup>-1</sup> (60 rpm); 1,66 s<sup>-1</sup> (100 rpm); 3,33 s<sup>-1</sup> (200 rpm) e 51,00 s<sup>-1</sup> (300 rpm).

Para caracterizar o comportamento de fluxo da pasta de cimento, em qualquer geometria (tubo ou anular), deve ser selecionado um modelo que melhor represente os dados. Para fazer isto, os dados obtidos (velocidades angulares e leituras de torque) foram convertidos a taxas e tensões de cisalhamento, respectivamente. Nas equações de comportamento de fluxo considera-se que o fluido seja homogêneo, o deslizamento na parede seja negligenciável, o fluido exiba comportamento independente do tempo e que o regime de fluxo seja laminar.

Ao final, determinam-se os seguintes parâmetros: Limite de Escoamento (LE) e Viscosidade Plástica (VP), aplicando-se o modelo matemático de Bingham, o qual relaciona estes dois parâmetros.

#### **4.2.3. Determinação do volume de perda de fluido**

Para a realização deste teste, as pastas formuladas foram misturadas e homogeneizadas de acordo com o item 4.2.1. O teste será realizado em um filtro prensa modelo HPHT 387 da FANN, na temperatura de 115°F. Antes do fechamento da célula, é colocado uma peneira com filtro, de abertura de 44 µm (#325 mesh), para filtrar a pasta que foi pressurizada a 1000 psi com N<sub>2</sub> durante 30 minutos ou até completar a desidratação completa da pasta, registrando-se o período de tempo e encerrando o teste (API, 2005).

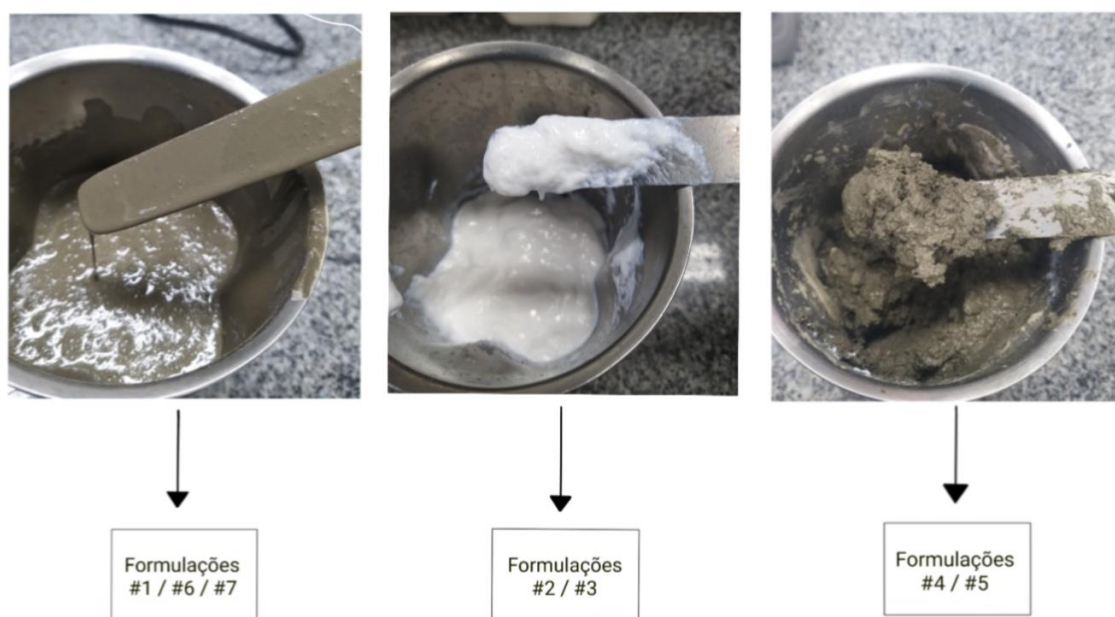
Para os testes de determinação do volume de perda de fluido que atingem o período de tempo final de 30 minutos, a perda de fluido é calculada multiplicando-se por dois o volume de fluido coletado durante o teste. Para os testes que apresentam desidratação da pasta em um período inferior a 30 minutos, extrapola-se o volume de filtrado para um tempo igual a 30 minutos.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. ANÁLISE DE MISTURA

Como o látex influencia na viscosidade da pasta, consideramos adicionar duas etapas ao fluxograma, pois em alguns casos o látex não seria compatível com o cimento, ou seja, ao adicionar o látex e/ou o cimento à água de mistura (solução composta por água e aditivos), poderíamos obter uma pasta não homogênea, impossibilitando a realização dos outros testes. Dessa forma, nesta etapa avaliamos as características da pasta durante o preparo da água de mistura e durante a adição do cimento e, dependendo dessas características, continuamos os testes ou descartamos a formulação. Considerando essas avaliações, foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 10 - Resultados dos testes de mistura.



Inicialmente consideramos a formulação #1 como referência, pois não apresentava látex na sua composição e, em seguida, realizamos a pesagem/mistura da pasta. Como podemos observar na Figura acima, obtivemos uma pasta com maior fluidez, possibilitando a continuação dos testes.

Após a realização dos testes com a pasta de referência, adicionamos látex no ponto máximo, ou seja,  $401,28 \text{ L/m}^3$  (3,0 gpc) de concentração (formulação #2). Durante



o preparo da água de mistura, após adicionar o látex, ocorreu a formação de uma pasta branca sólida, impossibilitando a adição do cimento e, conseqüentemente, a realização dos testes de reologia e filtrado.

Considerando o valor da concentração do látex e que não conseguimos adicionar o cimento, seguimos com a formulação #3, que tinha uma concentração menor de látex, 334,40 L/m<sup>3</sup> (2,5 gpc). Ao adicionar o látex à água de mistura, também ocorreu a formação da pasta branca, impossibilitando a continuidade nos testes, como podemos observar na Figura 10.

Sabendo que com 6,68 L/m<sup>3</sup> (0,05 gpc) de dispersante e 334,40 L/m<sup>3</sup> (2,5 gpc) de látex, formaríamos uma pasta branca, seguimos para a formulação #4, que apresentava uma concentração de látex de 200,64 L/m<sup>3</sup> (1,5 gpc). Ao adicionarmos o látex à água de mistura, obtivemos uma pasta menos sólida, possibilitando assim a continuidade da etapa de pesagem/mistura. Ao adicionarmos o cimento, seguindo o procedimento descrito no tópico 4.2.1., percebemos que a pasta não ficou fluida, impossibilitando seguir com os testes, como podemos observar na Figura 10. Um dos possíveis fatores seria a baixa concentração de dispersante ou a alta concentração de látex.

Dessa forma, aumentamos a concentração de dispersante formulando a pasta #5. Seguindo o mesmo procedimento, ao adicionarmos o cimento, a pasta não ficou fluida, impossibilitando também a realização dos testes de reologia e filtrado.

Diante dos resultados descritos acima, consideramos que o ponto de saturação do látex foi de 200,64 L/m<sup>3</sup> (1,5 gpc), pois nessa concentração já tínhamos dificuldade para misturar o cimento com a água de mistura e o cimento.

Seguindo esse ponto, diminuimos a concentração do látex para 66,88 L/m<sup>3</sup> (0,5 gpc) e aumentamos a concentração do dispersante para 10,70 L/m<sup>3</sup> (0,08 gpc), obtendo a formulação #6. Dessa forma, ao adicionarmos o cimento à água de mistura, obtivemos uma pasta fluida, possibilitando a realização dos testes de reologia e filtrado.

Como obtivemos uma pasta fluida com a formulação #6, decidimos tentar a formulação #7, onde tínhamos uma menor concentração de dispersante, 2,67 L/m<sup>3</sup> (0,02 gpc), pois esperava-se que, uma menor quantidade de dispersante seria suficiente para uma menor concentração de látex. Ao adicionarmos o cimento à água de mistura, obtivemos uma pasta um pouco densa, no entanto fluida o suficiente para seguir com os testes de reologia e filtrado.

## 5.2. PROPRIEDADES REOLÓGICAS

As pastas de cimento que passaram pela avaliação de compatibilidade, ou seja, as formulações #1, #6 e #7, foram analisadas à temperatura de 115°F, temperatura de circulação do poço (BHCT), onde foi observado que com o aumento da concentração do látex, ocorre um aumento nas propriedades reológicas (viscosidade plástica e limite de escoamento), como mostram as Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Resultados de Viscosidade Plástica.

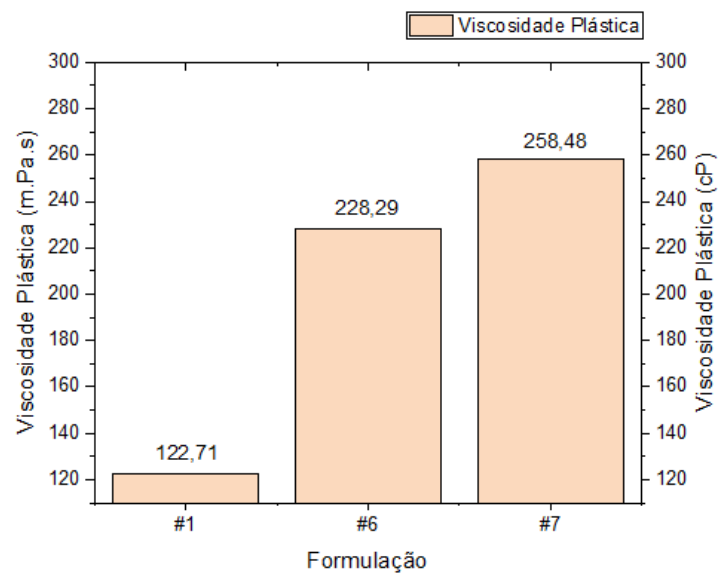
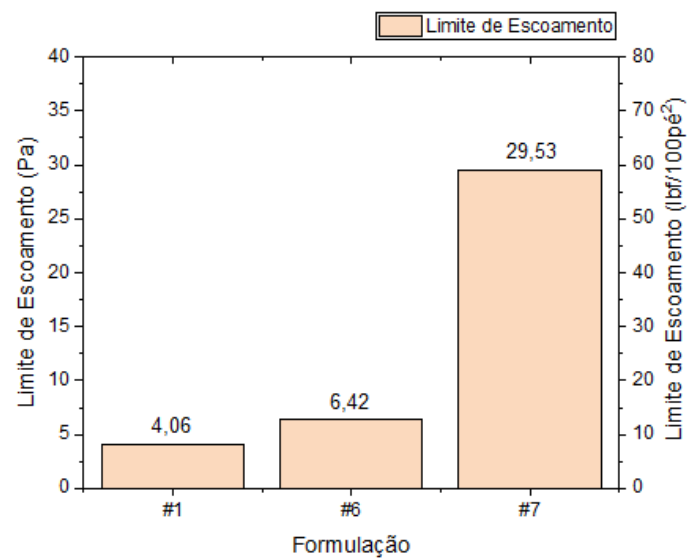


Figura 12 - Resultados de Limite de Escoamento.



Considerando esses resultados, podemos observar que houve um aumento na viscosidade plástica (VP) e no limite de escoamento (LE) quando aumentamos a concentração de látex. Esse aumento pode estar relacionado com a capacidade de entrelaçamento do látex, pois à medida que a concentração aumenta, maior é a capacidade de entrelaçamento do sistema. O entrelaçamento das partículas de látex é ocasionado pelas interações de natureza física e/ou química entre as moléculas de látex, provocando uma maior viscosidade ao sistema e um conseqüente aumento nos valores de limite de escoamento.

Figura 13 - Efeito provocado pelo entrelaçamento do polímero.



Fonte: Adaptado de (MACHADO, 2002).

No caso da formulação #1, onde não tínhamos látex, a pasta ficou bem fluida, com valores de VP e LE baixos. Isso se deve ao fato de a pasta não ter látex, proporcionando uma menor viscosidade.

Já a formulação #6, que tinha concentração de  $66,88 \text{ L/m}^3$  (0,5 gpc) de látex e  $10,70 \text{ L/m}^3$  (0,08 gpc) de dispersante, apresentou valores maiores de VP e LE, devido à presença de látex. Ele reage com os grãos de cimento, durante o processo de hidratação, formando uma cadeia de partículas entrelaçadas que incrementam a viscosidade da pasta.

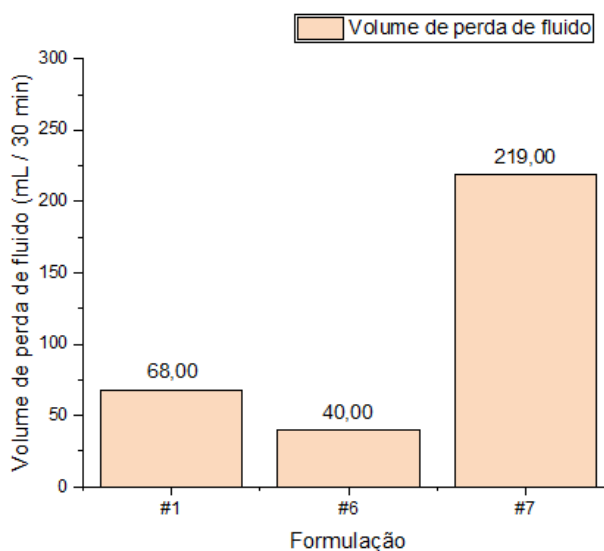
A formulação #7, que tinha  $66,88 \text{ L/m}^3$  (0,5 gpc) de látex e  $2,67 \text{ L/m}^3$  (0,02 gpc) de dispersante apresentou menor fluidez entre as três pastas. Por ter menos dispersante, a pasta ficou mais viscosa, obtendo valores mais altos de viscosidade plástica e limite de escoamento, resultado que credencia a formulação #7 como um bom projeto de pasta de cimento para esse tipo de aplicação, comprovando que uma maior concentração de dispersante possibilita melhores resultados da pasta de cimento bem executado, com

resultados positivos obtidos nesta formulação #7, torna o projeto adequado para o cenário de poço com migração de gás devido a otimização da concentração do dispersante.

### 5.3. VOLUME DE PERDA DE FLUIDO

O gráfico abaixo apresenta os resultados do teste de filtrado. Observamos que, com o aumento da concentração do látex, ocorre uma diminuição no volume de filtrado, no entanto, em um certo ponto, a proporção látex/dispersante ocasionou a desidratação da pasta, como podemos observar no valor de volume de filtrado da formulação #7.

Figura 14 - Resultados dos ensaios de perda de fluido.



Uma vez que a perda de fluido começa através da formação, um reboco de sólidos de cimento é depositado na superfície da formação. Os agentes controladores de perda de filtrado diminuem a taxa de filtração reduzindo a permeabilidade do reboco, aumentando a viscosidade da fase aquosa.

As partículas do látex reduzem a quantidade de movimentação da água através do bloqueio dos capilares, mas também formam um filme polimérico que tampona os canais e restringe a percolação de água e/ou de gás.

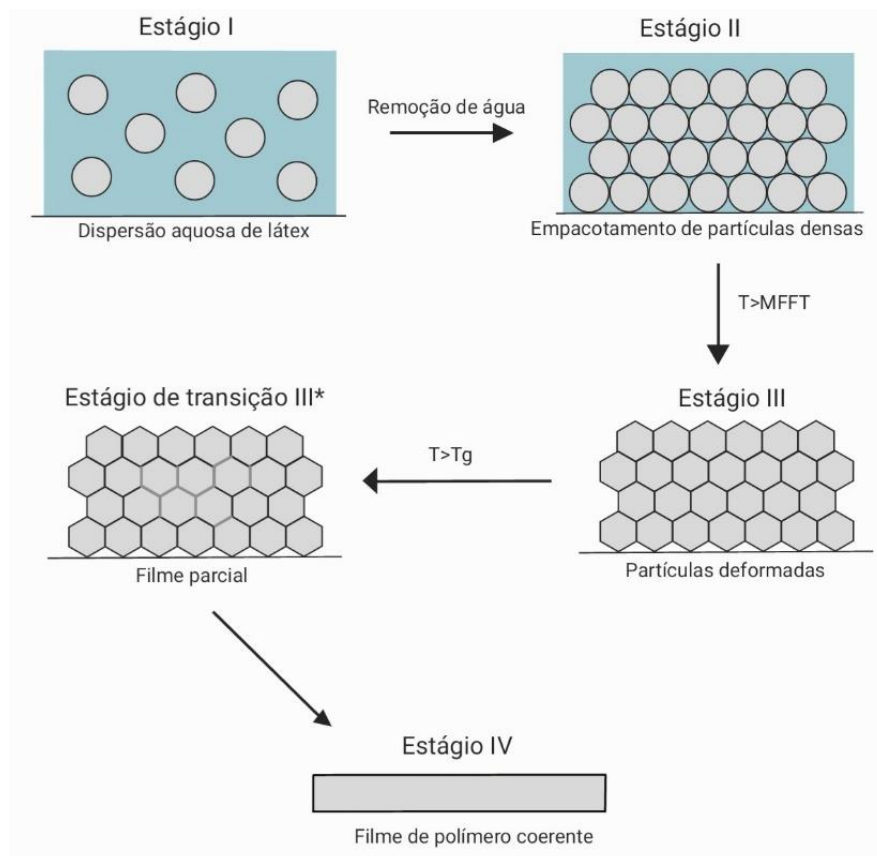
Ao entrar em contato com a água e com os grãos de cimento, as partículas do látex formam um filme polimérico ao redor dos grãos de cimento. O mecanismo de formação do filme polimérico pode ser descrito por quatro estágios característicos que ocorrem ao longo do caminho temporal após a secagem, deformação da partícula e coalescência. A partir de uma dispersão aquosa de látex (estágio I), a concentração do polímero de látex

aumenta continuamente após a remoção da água até que as partículas de látex se organizem em um empacotamento denso (estágio II). Nesse estágio, os espaços interpartículas ainda estão cheios de água.

Após a remoção da água dos espaços interpartículas, a deformação das partículas (estágio II) ocorre a temperaturas acima da temperatura mínima de formação de filme (MFFT), pelo qual os espaços interpartículas desaparecem após a formação de uma estrutura hexagonal em favo de mel. Nesta fase, as partículas individuais de látex ainda podem ser distinguidas umas das outras, através do qual as moléculas do emulsionante, localizadas na superfície das partículas de látex, formam uma camada limite hidrofílica e, assim, separam as partículas individuais.

As interfaces entre as partículas de látex se quebram e as cadeias poliméricas das partículas individuais se difundem uma das outras (interdifusão), resultando em um filme polimérico coerente e transparente (estágio IV) (BAUEREGER, 2014).

Figura 15 - Esquema do mecanismo de formação do filme de látex.



Fonte: Adaptado de (BAUEREGER, 2014).

Portanto, essa redução do volume de filtrado ocorreu devido ao preenchimento dos interstícios do reboco por partículas de látex, o qual se adere aos grãos de cimento formando um filme com baixa permeabilidade, dificultando a perda de filtrado da pasta para a formação, bem como, impedindo a entrada de fluido ou gás da formação para a pasta.

A restrição da movimentação de fluidos naturalmente ocorre nos dois sentidos, ou seja, também reduz a entrada de fluidos ou gás, aumentando a proteção a ataques de agentes químicos e resistência ao congelamento.

De acordo com a literatura, a taxa máxima geral de perda de filtrado API é 200 mL/30 min para poços de petróleo e 50 mL/30 min para poços de gás. Quando uma pasta contém controlador de filtrado suficiente para fornecer uma taxa de perda de filtrado API/ISSO de 25 mL/30 min, o reboco resultante é aproximadamente 1000 vezes menos permeável do que aquele obtido com uma pasta pura, ou seja, um bom filtrado ultra controlado teria um volume API/ISSO menor ou igual a 25 mL/30 min (NELSON; GUILLOT, 2006).

Observando a Figura 14, podemos inferir que a melhor pasta, de acordo com o volume de filtrado API, é a pasta #6, por possuir volume de 40 mL/30 min, no entanto, ainda assim, não poderia ser considerada como um filtrado ultra controlado. Entretanto, podemos observar que, ajustando a formulação, o látex pode funcionar como um agente controlador de filtrado ultra controlado.

Apesar da pasta #1 ter volume maior do que o padrão estabelecido, ela ainda sim é uma pasta que pode ser considerada nesse teste. Observamos que apenas o controlador de filtrado derivado de celulose conseguiu controlar o filtrado, no entanto, não agiu como um controlador de filtrado ultra controlado, pois obteve 68 mL/30 min de filtrado API. Já a pasta #7, desidratou em 6:42 min, impossibilitando a obtenção de um valor real de volume de filtrado. Por ter desidratado, extrapolamos esse valor de filtrado, seguindo os cálculos estabelecidos pelas normas, gerando um valor de 219,0 mL. Dessa forma, o uso desta formulação se torna inviável considerando que essa pesquisa visa obter um filtrado ultra controlado para migração de gás.

## 6. CONCLUSÃO

A proposta de empregar látex na formulação de pastas de cimento Portland para poços de petróleo surgiu por meio do desenvolvimento de novas tecnologias o propósito de aumentar o controle da migração do gás, buscando garantir a estabilidade mecânica e o isolamento zonal de um poço.

Diante do fato de que a cimentação primária é fundamental para o ciclo de vida do poço, a inspiração deste trabalho veio do desafio de obter resultados positivos que, por meio de sistemas de pastas, poderão controlar a migração do gás.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Com o aumento da concentração do látex foi observada uma redução no volume de filtrado e um aumento na viscosidade da pasta. Isso ocorre devido ao entrelaçamento das partículas de látex e conseqüente formação de um filme polimérico.
- O ponto de saturação do látex foi de 200,64 L/m<sup>3</sup> (1,5 gpc), pois nesse ponto foi observado a formação de uma pasta sólida durante o preparo da água de mistura, o que impossibilitou a realização dos testes.
- A melhor formulação foi a #6, pois foram obtidos bons valores de propriedades reológicas (LE e VP), bem como o volume de filtrado API foi de 40,0 mL/30 min. Mesmo não obtendo um volume de filtrado API considerado para um filtrado ultra controlado, observou-se que para um projeto de pasta de cimento para combate à migração de gás deve se levar em consideração não somente a concentração do controlador de filtrado, mas também a concentração do dispersante e, principalmente, a concentração do látex, para que um filtrado ultra controlado seja atingido.

A partir dos resultados obtidos, podemos sugerir um estudo mais específico da relação látex/dispersante, assim como da adição de um surfactante ao sistema, de forma a melhor estabilizar o látex. Dessa forma, poderemos melhor avaliar o comportamento desse tipo de tecnologia para combate a migração de gás.

## REFERÊNCIAS

AL-YAMI, A.S.; RAMASAMY, Jothibasu; WAGLE, Vikrant. Chemical Additives for Oil Well Cementing. **Research & Reviews: Journal of Chemistry**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 1–14, 2017.

API. **API RP 10B-2: Recommended Practice for Testing Well Cements**. 1ªed. [S. l.: s. n.], 2005.

BALLISTA, Luiz Paulo Zuppani. **Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno**. 2003. - Escola de Engenharia de São Carlos, [s. l.], 2003.

BAUEREGER, Stefan Matthias. **Interaction of latex polymers with cement-based building materials**. 2014. - Technischen Universität München, [s. l.], 2014.

BBC NEWS. **Oil rig sinks in Gulf of Mexico after explosion**. [S. l.], 2010. Disponível em: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/8638638.stm>. Acesso em: 18 fev. 2020.

BENSTED, John. Admixtures for Oilwell Cements. **Concrete**, [s. l.], n. iv, 1996.

BONETT, Art; PAFITIS, Demos. Getting to the Root of Gas Migration. **Oilfield Review**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 36–49, 1996.

CELIA, M. A.; BACHU, S. Geological Sequestration of CO<sub>2</sub>: Is Leakage Unavoidable and Acceptable? *In: , 2003, Pergamon; Amsterdam. (J. and Y. Kaya Gale, Org.)***Proceeding of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies**. Pergamon; Amsterdam: [s. n.], 2003. p. 477–482.

CHEUNG, Ping Sun R.; BEIRUTE, Robert M. Gas Flow in Cements. **JPT, Journal of Petroleum Technology**, [s. l.], v. 37, n. 7, p. 1041–1048, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/11207-pa>



DISTLER, Dieter. **Wäßrige Polymerdispersionen**. Weinheim: [s. n.], 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/3527603263>

FREITAS, Jc De Oliveira. **Adição de poliuretana em pastas de cimento para poços de petróleo como agente de correção do filtrado**. 2008. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), [s. l.], 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/1/7429>

HALLIBURTON COMPANY. **Cimentação (apostila)**. Mossoró, RN: [s. n.], 1998.

MACHADO, J.C.V. **Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2002.

MARINHO, E. P. M. **Desenvolvimento de Pastas Geopoliméricas para Cimentação de Poços de Petróleo**. 2004. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), [s. l.], 2004.

MARTINEZ, J.; MACDONALD, W. J. **Study of Cementing Practice Applied to the Shallow Casing in Offshore Wells**. Houston, Texas: Maurer Engineering Inc. Houston, 1980.

MASON, Thomas O.; LEA, Frederick M. **Cement**. In: BRITANNICA. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material>

NELSON, Erik B.; GUILLOT, Dominique. **Well Cementing**. [S. l.]: Schulumberger Educational Services, 2006.

PETRÓLEO BRASILEIRO S. A. **PETROBRÁS: Curso Básico sobre Cimentação Primária**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2002.

SANTOS JUNIOR, B. F. **Modificações Morfológicas e Estruturais de Pastas de Cimento Aditivadas com Termofixos a Base de Epóxi para Utilização em Poços de Petróleo**. 2006. - Universidade Federal de Sergipe, [s. l.], 2006.

SILVA, D. A.; ROMAN, H. R.; GLEIZE, P. J. P. Evidências de Interação Química do Copolímero EVA com Cimento Portland em Hidratação. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção**, [s. l.], p. 54–65, 2004.

SMITH, D. K. **SPE Monograph Series 4: Cementing**. 2<sup>o</sup>ed. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers Inc., 1990.

VUK, T. *et al.* Tertiary gelation of oilwell cement. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00414-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00414-2)

WALTERS, G. Latex hydraulic cement additives. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 1204, p. 71–76, 1988.

WALTERS, G. What are latexes? **Concrete International**, [s. l.], v. 9, p. 44–47, 1987.