



INFLUÊNCIA DOS CLORETOS DE SÓDIO E DE POTÁSSIO NAS
PROPRIEDADES PLÁSTICAS E NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
PASTAS PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Bruno Bolsanelo de Souza

Sergio Pinto de Moura Souza Borges

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Paulo Couto

Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2011

Souza, Bruno Bolsanelo

Borges, Sergio Pinto de Moura Souza

Influência dos Cloretos de Sódio e de Potássio nas Propriedades Plásticas e no Comportamento Mecânico de Pastas para Cimentação de Poços de Petróleo/Bruno Bolsanelo de Souza e Sergio Pinto de Moura Souza Borges. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

xviii, 138 p.: Il.; 29,7 cm.

Orientadores: Paulo Couto e Romildo Dias Toledo Filho.

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Petróleo, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 112 – 114.

1. Introdução
2. Cimentação de Poços de Petróleo
3. Rochas Salinas
4. Programa Experimental, Materiais e Métodos de Ensaio
5. Apresentação e Análise de Resultados
6. Conclusões

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

Influência dos Cloretos de Sódio e de Potássio nas Propriedades Plásticas e no Comportamento Mecânico de Pastas para Cimentação de Poços de Petróleo

Bruno Bolsanelo de Souza

Sergio Pinto de Moura Souza Borges

Fevereiro/2011

Orientadores: Paulo Couto e Romildo Dias Toledo Filho

Curso: Engenharia de Petróleo

A pasta de cimento a ser utilizada na construção de um poço de petróleo deve ser formulada após um estudo das propriedades físico-químicas das rochas. No caso de formações salinas, o contato do cimento com a camada de sal pode provocar a dissolução de parte do sal da rocha e o aumento na salinidade na pasta pode resultar em mudanças significativas em suas propriedades podendo comprometer a qualidade da cimentação. O objetivo deste trabalho é analisar a influência do sal nas propriedades reológicas, de água livre e resistência à compressão de pastas de cimento. Para tanto, foi realizado uma revisão bibliográfica a fim de identificar os principais estudos já realizados sobre o assunto e, em seguida, foram realizados experimentos visando contribuir para o entendimento do efeito do sal nas propriedades mencionadas. A pasta foi preparada com água, cimento classe G, aditivo anti-espumante e com os seguintes tipos e teores dos sais: cloreto de sódio, com 5%, 10%, 12,5%, 15% e 17,5% e cloreto de potássio, com 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, além da pasta de referência.

Palavras-Chave: Cimentação, Petróleo, Pastas Salinas e Rochas Salinas

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Petroleum Engineer.

Influence of Sodium Chloride and Potassium Chloride in Plastic Properties and Mechanical Behavior of slurries for Cementing Oil Wells

Bruno Bolsanelo de Souza

Sergio Pinto de Moura Souza Borges

February/2011

Advisor: Paulo Couto and Romildo Dias Toledo Filho

Course: Petroleum Engineering

The slurry used for cementing oil wells should be made after a study of the physicochemical properties of rocks. In the case of salt formations, the contact of cement with a layer of salt can cause the dissolution of part of rock salt. The increase in slurry salinity results in significant changes in their properties and may compromise the quality of cementing. The aim of this study is to analyze the influence of salt on the rheological properties, free water and compressive resistance of the slurry. To that end, we conducted a literature review to identify key studies already done on the subject and then tests were carried out to contribute to understanding the effect of salt on the properties mentioned. The slurry was prepared with water, Class G cement, antifoam agent and the following types and concentrations of salts: sodium chloride, 5%, 10%, 12.5%, 15% and 17.5% and potassium chloride, with 2.5%, 5%, 7.5% and 10% and slurry without salt.

Keywords: Cementing, Oil, Salt Slurry, Salt Rock

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos professores, pesquisadores, técnicos, secretárias do Laboratório de Estruturas da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Ao Programa de Engenharia Civil (PEC/COPPE/UFRJ).

Também agradecemos aos professores do curso de engenharia de petróleo.

Aos nossos familiares e amigos.

Ao Centro de Pesquisas da PETROBRAS - CENPES.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
CAPÍTULO 2	CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	4
2.1	HISTÓRICO DE UTILIZAÇÃO.....	4
2.2	TIPOS DE CIMENTAÇÃO.....	5
2.2.1	<i>Cimentação Primária.....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Cimentação Secundária.....</i>	<i>6</i>
2.3	FATORES QUE AFETAM A CIMENTAÇÃO.....	7
2.3.1	<i>Processo de Deslocamento e Fatores que Afetam sua eficiência..</i>	<i>8</i>
2.3.1.1	Temperatura e Pressão.....	8
2.3.1.2	Gradiente de Fratura e de Poros da Formação.....	9
2.3.1.3	Característica do Poço.....	9
2.3.1.4	Propriedades do Fluido de Perfuração.....	10
2.3.1.5	Regime de Fluxo/Vazão de Deslocamento.....	11
2.3.1.6	Centralização do Revestimento.....	11
2.3.1.7	Efeito da Queda Livre do Cimento.....	12
2.3.1.8	Rotação e Reciprocção.....	12
2.3.1.9	Uso de Tampão de Topo e de Fundo.....	12

2.3.1.10	Colchões Lavadores e Espaçadores.....	12
2.3.2	<i>Principais Falhas.....</i>	13
2.4	SEQUÊNCIA OPERACIONAL CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA.....	15
2.5	CIMENTO PORTLAND.....	17
2.5.1	<i>Processo de Fabricação.....</i>	18
2.5.2	<i>Composição Química.....</i>	19
2.5.3	<i>Hidratação do Cimento Portland.....</i>	20
2.5.3.1	Silicatos de Cálcio Hidratados.....	22
2.5.3.2	Aluminato Tricalcico e a Ação do Gesso.....	23
2.5.4	<i>Pega do Cimento.....</i>	25
2.5.5	<i>Cimento Classe G e Especial.....</i>	30
2.5.6	<i>Relações entre as Composições Química e Física do Cimento Classe G e Especial com as Principais Propriedades da Pasta Pura.....</i>	30
2.5.6.1	Aluminato Tricálcico (C3A).....	30
2.5.6.2	Silicato Tricálcico (C3S)	30
2.5.6.3	Ferro-Aluminato Tetracálcico (C4AF)	31
2.5.6.4	Silicato Bicálcico (C2S)	31
2.5.6.5	Perda ao Fogo (%).....	31
2.5.6.6	Resíduo Insolúvel (%).....	31
2.5.6.7	SO3 (%).....	32
2.5.6.8	CaOlivre (%).....	32
2.5.6.9	MgO (%).....	32
2.5.6.10	Equivalente Alcalino (%).....	32

2.6	PASTAS PARA CIMENTAÇÃO.....	32
2.7	ADITIVOS.....	33
2.7.1	<i>Aceleradores.....</i>	33
2.7.2	<i>Retardadores.....</i>	34
2.7.3.	<i>Estendedores.....</i>	34
2.7.4	<i>Dispersantes.....</i>	34
2.7.5	<i>Controladores de filtrado.....</i>	35
2.7.6	<i>Controladores de perda de circulação.....</i>	35
2.6.7	<i>Adensantes.....</i>	35
2.6.8	<i>Outros.....</i>	35
2.8	EQUIPAMENTOS DE CIMENTAÇÃO.....	36
2.9	AVALIAÇÃO DA CIMENTAÇÃO.....	39

CAPÍTULO 3 ROCHAS SALINAS.....41

3.1	INTRODUÇÃO.....	41
3.2	TECTÔNICA.....	42
3.2.1	<i>Mecânica do Movimento do Sal.....</i>	42
3.2.2	<i>Formação de Diápiros de Sal.....</i>	42
3.2.3	<i>Controles Tectônicos para a Sedimentação de Evaporitos.....</i>	45
3.3	SEDIMENTAÇÃO.....	47
3.4	INTRODUÇÃO À SOLUBILIDADE DOS SAIS EM ÁGUA.....	50
3.5	PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS.....	52

3.5.1	<i>Propriedades Químicas</i>	52
3.5.1.1	Potencial Iônico.....	53
3.5.1.2	Lei dos Íons Comuns.....	55
3.5.1.3	Propriedades Iônicas dos Minerais Evaporíticos e sua Implicação para a Tectônica.....	56
3.5.1.4	Sequência de Deposição de Minerais Evaporíticos.....	57
3.5.2	<i>Propriedades Físicas</i>	61
3.5.2.1	Densidade.....	62
3.5.2.2	Viscosidade.....	63
3.5.2.3	Resistência ao Esforço Compressional e Extensional.....	63
3.5.2.4	Condutividade Térmica.....	64
3.5.2.5	Velocidade Sísmica.....	64
3.5.2.6	Susceptibilidade Magnética.....	64
3.5.2.7	Ponto de Fusão.....	65
3.6	FENÔMENOS TÉRMICOS ASSOCIADOS.....	65
3.7	FLUÊNCIA.....	66
3.8	DESAFIOS DA CIMENTAÇÃO DE POÇOS EM ROCHAS EVAPORÍTICAS.....	68
CAPÍTULO 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO.....		68
4.1	MATERIAIS.....	68
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	71
4.3	PREPARO DAS PASTAS DE CIMENTO.....	72

4.4	METODOLOGIAS DE ENSAIO	74
4.4.1	<i>Água Livre</i>	74
4.4.2	<i>Reologia</i>	76
4.4.3	<i>Peso Específico</i>	80
4.4.4	<i>Resistência à Compressão Axial</i>	81
4.4.5	<i>Resistência à Tração por Compressão Axial</i>	85
 CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....		87
5.1	PERCENTUAL DE ÁGUA LIVRE.....	87
5.2	REOLOGIA.....	90
5.3	PESO ESPECÍFICO.....	94
5.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	97
5.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL...	104
 CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES.....		109
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		112
 ANEXOS		
AI. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL – FORÇA DE COMPRESSÃO.....		115
AII. DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO INDIRETA.....		117
AIII. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....		122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Remoção inadequada dos fluidos do anular (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990)

Figura 2 - Sequência Operacional da Cimentação Primária (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990)

Figura 3 - Sistema de Cimentação Submarino (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990)

Figura 4 - Esquema da Fabricação de Cimento (Fonte: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao>)

Figura 5 - Etapas da Hidratação do Cimento (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990)

Figura 6 - Configuração típica do sistema de cimentação (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986)

Figura 7 - Centralizador (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986)

Figura 8 - Collar (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986)

Figura 9 - Sapata (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986)

Figura 10 - Plug (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986)

Figura 11 - Collar de Estágio (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986)

Figura 12 - Depósitos Globais de Sais (Fonte: Farmer *et al*, 1996)

Figura 13 - Estágio Inicial – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005)

Figura 14 - Estágio Intermediário – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005)

Figura 15 - Estágio Intermediário – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005)

Figura 16 - Estágio Final – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005)

Figura 17 - Halita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Figura 18 - Silvita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Figura 19 - Carnalita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Figura 20 - Anidrita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Figura 21 - Gipsita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Figura 22 - Kieserita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Figura 23 - kainite (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

Figura 24 - Bloedita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

Figura 25 - Deionizador de Água

Figura 26 - Aspecto do Cimento Portland Classe G

Figura 27 - Aspecto do Cloreto de Sódio

Figura 28 - Aspecto do Cloreto de Potássio Misturador

Figura 29 - Misturador

Figura 30 - Espátula

Figura 31 - Funil

Figura 32 - Consistômetro Atmosférico

Figura 33 - Frasco de Erlenmeyer

Figura 34 – Balança Digital

Figura 35 - Filme Selante

Figura 36 - Ensaio de Água Livre

Figura 37 - Viscosímetro

Figura 38 - Balança de Lama

Figura 39 – Bastão de Vidro

Figura 40 - Prensa *Shimadzu UH-F* 1000 KN

Figura 41 - Molde Cilíndrico

Figura 42 - Moldes

Figura 43 - Banho Térmico

Figura 44 - Ensaio de Resistência à Compressão

Figura 45 - Ensaio de Tração por Compressão Diametral

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Causas de Falha na Cimentação Primária (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990)

Tabela 2 - Principais Constituintes do Cimento (Fonte: Petrucci, 1984)

Tabela 3 - Requisitos Físicos dos Cimentos Classes G e especial (Fonte: NBR 9831)

Tabela 4 - Propriedades Reológicas dos Cimentos Classes G e Especial (Fonte: NBR 9831)

Tabela 5 - Requisitos Químicos dos Cimentos Classes G e Especial (Fonte: NBR 9831)

Tabela 6 - Minerais Evaporíticos Marinhos (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Tabela 7 - Minerais Evaporíticos Não-Marinhos (Fonte: www.jisanta.com/Geologia)

Tabela 8 - Raio Atômicos dos Elementos mais Comuns (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008)

Tabela 9 - Composição Química dos Principais Minerais Evaporíticos (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008)

Tabela 10 - Componentes das Rochas Salinas (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008)

Tabela 11 - Propriedades Físicas da Halita (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008)

Tabela 12 - Viscosidade Média de Alguns Materiais Fluidos (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008)

Tabela 13 - Resistência à Compressão e Tensão de Rochas Salinas (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008)

Tabela 14 - Dosagem das Pastas Estudadas

Tabela 15 - Composição Química (% de massa) do Cimento Portland

Tabela 16 - Propriedades Físicas do Cimento Portland

Tabela 17 - BOB (Fonte: Campos *et al.*, 2005)

Tabela 18 - Tipo de Mola (Fonte: Campos *et al.*, 2005)

Tabela 19 - Percentual de Água Livre para Pastas com NaCl

Tabela 20 - Percentual de Água Livre para Pastas com KCl

Tabela 21 - Viscosidade Plástica para Pastas com NaCl

Tabela 22 - Limite de Escoamento para Pastas com NaCl

Tabela 23 - Viscosidade Plástica para Pastas com KCl

Tabela 24 - Limite de Escoamento para Pastas com KCl

Tabela 25 - Peso Específico para Pastas com NaCl

Tabela 26 - Peso Específico para Pastas com KCl

Tabela 27 Resistência à Compressão para Pastas com NaCl

Tabela 28 – Resistência à Compressão para Pastas com KCl

Tabela 29 - Módulo de Elasticidade para Pastas com NaCl

Tabela 30 - Módulo de Elasticidade para Pastas com KCl

Tabela 30 - Coeficiente de Poisson para Pastas com NaCl

Tabela 32 - Coeficiente de Poisson para Pastas com KCl

Tabela 33 - Tração para Pastas com NaCl

Tabela 34 - Tração para Pastas com KCl

Tabela 35 - Resistência à Tração por Compressão Diametral com NaCl

Tabela 36 - Resistência à Tração por Compressão Diametral com KCl.

Tabela 37. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta de Referência.

Tabela 38 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 5% NaCl

Tabela 39 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 10% NaCl

Tabela 40 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 12,5% NaCl

Tabela 41 - Dimensões dos Corpos de Prova – 15% NaCl

Tabela 42 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 17,5% NaCl

Tabela 43 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 2,5% KCl

Tabela 44 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 5% KCl

Tabela 45 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 7,5% KCl

Tabela 46 - Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 10% KCl

Tabela 47 - Análise Estatística para os Ensaios de Água Livre das Pastas com NaCl

Tabela 48 - Análise Estatística para os Ensaios de Água Livre das Pastas com KCl

Tabela 49 - Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (VP) das Pastas com NaCl

Tabela 50 - Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (VP) das Pastas com KCl

Tabela 51 - Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (LE) das Pastas com NaCl

Tabela 52 - Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (LE) das Pastas com KCl

Tabela 53 - Análise Estatística para o Peso Específico das Pastas com NaCl

Tabela 54 - Análise Estatística para o Peso Específico das Pastas com KCl

Tabela 55 - Análise Estatística para Resistência à Tração por Compressão Diametral com NaCl

Tabela 56 - Análise Estatística para Resistência à Tração por Compressão Diametral com KCl

Tabela 57 - Análise Estatística para o Módulo de Elasticidade das Pastas com NaCl

Tabela 58 - Análise Estatística para o Módulo de Elasticidade das Pastas com KCl

Tabela 59 - Análise Estatística para o Coeficiente de Poisson das Pastas com NaCl

Tabela 60 - Análise Estatística para o Coeficiente de Poisson das Pastas com KCl

Tabela 61 - Análise Estatística para Tração Indireta para as Pastas com NaCl

Tabela 62 - Análise Estatística para Tração Indireta para as Pastas com KCl

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição Granulométrica do Cimento Portland.

Gráfico 2 - Variação do Percentual de Água Livre para Pasta com NaCl

Gráfico 3 - Variação do Percentual de Água Livre para Pasta com KCl

Gráfico 4 - Variação da Viscosidade Plástica para Pastas com NaCl

Gráfico 5 - Variação do Limite de Escoamento para Pastas com NaCl

Gráfico 6 - Variação da Viscosidade Plástica para Pastas com KCl

Gráfico 7 - Variação do Limite de Escoamento para Pastas com KCl

Gráfico 8 - Variação do Peso Específico para Pastas com NaCl

Gráfico 9 - Variação do Peso Específico para Pastas com KCl

Gráfico 10 - Variação da Resistência à Compressão para Pastas com NaCl

Gráfico 11 - Variação da Resistência à Compressão para Pastas com KCl

Gráfico 12 - Variação do Módulo de Elasticidade para Pastas com NaCl

Gráfico 13 - Variação do Módulo de Elasticidade para Pastas com KCl

Gráfico 14 - Variação do Coeficiente de Poisson para Pastas com NaCl

Gráfico 15 - Variação do Coeficiente de Poisson para Pastas com KCl

Gráfico 16 - Variação da Resistência à Tração para Pastas com NaCl

Gráfico 17 - Variação da Resistência à Tração para Pastas com KCl

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Com a crescente demanda de petróleo no mercado mundial se faz necessário buscar petróleo em novas fronteiras consideradas até então inexploráveis. Assim grandes desafios surgem na etapa de exploração e produção, principalmente na construção do poço.

A cimentação de poços de petróleo consiste em uma etapa crítica durante a fase de perfuração de um poço, pois é através da cimentação que se garante o isolamento hidráulico entre fases, de forma que a perfuração da fase seguinte seja realizada com segurança. Problemas durante a operação de cimentação podem causar sérios danos, podendo inclusive acarretar a perda do poço. As principais funções da pasta de cimento consistem no isolamento do anular, devido à baixa permeabilidade, assim como atingir resistência mecânica suficiente para suportar os esforços aos quais estão submetidos.

As propriedades requeridas das pastas de cimento utilizadas nas operações de cimentação variam muito e dependem das características do poço que será perfurado. Costumam-se utilizar aditivos nas pastas, tais como, estendedores, aceleradores ou retardadores de pega, dispersantes e adensantes. Estes possuem a função de adequar a pasta às necessidades que se terá no poço a ser perfurado. Características como alta temperatura, alta pressão, grandes profundidades e formações salinas requer um maior cuidado na elaboração dos aditivos.

A cimentação frente às formações salinas tem como principal problema a incorporação do sal pela pasta bombeada, o que causa grandes dificuldades para a operação, pois essa quantidade adicional de sal muda as propriedades plásticas e o comportamento mecânico da pasta podendo ocasionar grandes problemas para a operação de cimentação, pois pode causar uma má cimentação ou até mesmo se perder o poço, então se faz necessário uma criteriosa elaboração da pasta. Outro problema de grande relevância em formações salinas é o de fluência. Este fenômeno é o grande responsável pelo aprisionamento da coluna de perfuração e abandono do poço, em que devido ao fato do sal ser bastante móvel, ele rapidamente fecha o poço causando serias conseqüências a perfuração e a cimentação.

Estudos recentes estão sendo feitos para a melhor compreensão do fenômeno da absorção de sal e suas conseqüências nas propriedades reológicas, conforme Zhou (1996) que estudou a influência do sal na hidratação de pastas de cimento. Ismail (1993) estudou as vantagens e desvantagens da utilização de uma pasta com alta ou baixa

concentração de sal. Hunter (2009) mostrou a importância de um cuidadoso estudo de cada poço a ser cimentado, focando as diferenças necessárias na pasta devido às mudanças das condições da cimentação, citando casos de cimentação em diferentes partes do mundo, afirmando que não se tem uma formulação ótima, pois ela irá depender das necessidades do poço a ser realizado.

Os novos campos petrolíferos encontrados no Brasil denominados de Pré-Sal possuem largas camadas de formação salinas situadas em grandes profundidades, dificultando ainda mais o processo de exploração desses campos. Motivado pelas novas descobertas e seus desafios, o presente trabalho tem por objetivo estudar os problemas associados à cimentação nestas camadas salinas.

Atualmente, em se tratando de pastas para utilização em formações salinas, existem disponíveis três diferentes formulações que variam com o percentual de sal dissolvido no peso de água contido no cimento, e uma quarta pasta chamada pasta espumada. São elas: pastas salinas “ricas em sal” (percentuais de NaCl próximos da saturação); pastas salinas “pobres em sal” (percentuais baixos - até 10% - de NaCl na mistura); pastas com concentração de sal entre 3 e 5% B.W.O.W. (*By Weight Of Water*) de KCl e a pasta espumada na qual se adiciona nitrogênio, tornando a pasta mais leve favorecendo o bombeio e a cimentação. (Mohriak *et al*, 2009).

A partir dessas informações, partindo de uma pasta de referência, são acrescentados os sais NaCl e KCl de forma gradual, por peso de água, conforme: 5%, 10%, 12,5%, 15% e 17,5% para o cloreto de sódio e 2,5%, 5%, 7,5% e 10% para o cloreto de potássio. Esses percentuais são relacionados ao peso de água. Foram realizados testes para analisar as mudanças nas propriedades da pasta devido à crescente quantidade de sal incorporado. Os testes visaram analisar as propriedades reológicas da pasta e sua influência durante o processo de cimentação averiguando suas propriedades para garantir sua bombeabilidade e uma eficiente remoção da lama de perfuração. Visou também observar a mudança na quantidade de água livre fator de grande relevância, pois conforme Nelson (1990) a presença de água livre no poço pode ter como conseqüências: migração de gás ou óleo causando perda de isolamento e corrosão do revestimento. A migração da água promove canais ascendentes no cimento final, que poderá permitir a migração de óleo e principalmente de gás. A presença de água, em contato com o revestimento, poderá provocar a corrosão do revestimento e assim haverá risco de colapso do revestimento. E por fim, estudar o comportamento da pasta de

cimento quanto sua resistência a compressão, fator de suma importância em formações salinas, devidas sua alta taxa de fluência.

1.2. Objetivo

O trabalho focou no conhecimento dos efeitos da adição de sal nas pastas de cimentação. Para tal, foi adotada uma pasta padrão e a partir dela acrescentado sal em diferentes proporções para testar mudanças em suas propriedades.

Com isso visou-se formar uma base de conhecimento sobre o comportamento das pastas frente às formações salinas, no que diz respeito às mudanças ocorridas em sua reologia, resistência à compressão e água livre, devido à incorporação do sal oriundo da formação.

A execução se dividiu em duas fases tendo por base o sal utilizado. Na primeira foi utilizado o cloreto de sódio (NaCl) como sal adicionado devido a ser o tipo de sal predominante em formações salinas. Na segunda etapa adotou-se o cloreto de potássio (KCl) como sal adicionado, baseado em revisão bibliográfica que se observou a utilização desse sal nas pastas frente as formações salinas.

1.3. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em sete capítulos onde o capítulo 1 é a introdução onde se aborda a motivação do trabalho, os objetivos e a sua estrutura.

O capítulo 2 apresenta uma introdução sobre a cimentação na indústria do petróleo, em que são abordados seus principais aspectos, desde a parte operacional com equipamentos e ferramentas até a elaboração das pastas para cimentação, com seus respectivos aditivos e o cimento propriamente dito.

O capítulo 3 trata da geologia das estruturas salinas, especificando os sais que a formam suas propriedades e sua interação com o poço de petróleo em especial com a etapa de cimentação.

No capítulo 4 são descritas todas as metodologias dos ensaios realizados, baseados em normas específicas. Os ensaios realizados foram: compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, água livre, reologia e massa específica.

O capítulo 5 apresenta os resultados dos ensaios, tratados estatisticamente, e as análises realizadas à partir dos dados obtidos.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

2. CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

A principal função da cimentação primária é promover o isolamento entre os diversos intervalos permeáveis, ou até mesmo dentro de um mesmo intervalo, impedindo a migração de fluidos por trás do revestimento, bem como propiciar suporte mecânico ao revestimento.

O isolamento hidráulico da formação é de fundamental importância para que se garanta um perfeito controle da origem (ou destino) dos fluidos produzidos (ou injetados). A não ocorrência do isolamento pode gerar: uma produção de fluidos indesejáveis devido à proximidade dos contatos óleo/água ou gás/óleo, testes de avaliação de formações incorretos, prejuízo no controle dos reservatórios e operações de estimulação mal sucedidas e até a possibilidade de perda do poço.

2.1. Histórico de Utilização

O uso do cimento em poços de petróleo iniciou na Califórnia em 1883, porém somente em 1902 passou a utilizar-se o cimento Portland em processo manual de mistura com água para a obtenção da pasta de cimento. Em 1910, Perkins patenteou o método de bombear a pasta para o poço com tampões metálicos à frente e atrás desta, evitando contaminação, sendo deslocada por vapor, água ou fluido de perfuração.

Em 1922, Halliburton, patenteou o misturador com jatos (jetmixer), automatizando a mistura da pasta, ampliando as possibilidades operacionais, fazendo com que a prática de cimentar os poços fosse adotada pela maioria das companhias, o que promoveu um grande desenvolvimento da cimentação em poços de petróleo, porém aguardava-se de 7 a 28 dias para o endurecimento do cimento.

A partir de 1923, fabricantes americanos e europeus de cimento passaram a fabricar cimentos especiais para a indústria de petróleo, com alta resistência inicial. Com o início da utilização dos aditivos o tempo de pega foi sendo gradualmente reduzido e outras propriedades da pasta de cimentação foram controladas. Hoje as pastas podem se manter fluidas por certo tempo, mesmo em altas temperaturas e pressões (4 horas em geral) permitindo seu deslocamento em poços profundos. A partir deste tempo a pasta endurece rapidamente e as atividades no poço podem ser retomadas em 6 a 8 horas após a cimentação.

2.2. Tipos de Cimentação

2.2.1. Cimentação Primária

Esta é a principal cimentação, realizada logo após a descida de cada coluna de revestimento no poço sendo, portanto, prevista no programa do poço. Tem como objetivo básico colocar uma pasta de cimento íntegra, não contaminada, no espaço anular entre a formação e a coluna de revestimento, garantindo uma fixação e vedação eficiente e permanente do anular.

Os objetivos básicos da cimentação primária são: aderência mecânica ao revestimento e à formação, isolamento das formações atravessadas e proteção do revestimento contra corrosão e cargas dinâmicas decorrentes de operações no seu interior.

Dependendo do tipo de revestimento a ser cimentado ou de condições especiais do poço se têm objetivos específicos conforme a seguir:

- **Revestimento Condutor:** Evitar a erosão das camadas superficiais geralmente inconsolidadas;
- **Revestimento de Superfície:** Proteger as formações portadoras de água doce; Suportar equipamentos de segurança do poço e Suportar outras colunas de revestimento. Nessa etapa é obrigatória a cimentação ao longo de todo o revestimento;
- **Revestimento Intermediário** Isolar as formações com pressões anormalmente baixas ou anormalmente altas; Isolar as formações incompetentes e sensíveis ao contato com o fluido de perfuração;
- **Revestimento de Produção:** Proteção das zonas portadoras de hidrocarbonetos para evitar redução da produtividade, que pode ocorrer devido a uma possível sensibilidade da formação aos fluidos contidos no poço; Isolar as zonas para desenvolvimento seletivo de diferentes intervalos;
- **Inner String:** Nos casos onde são encontrados trechos a cimentar com diâmetros muito largos, o tempo de deslocamento e o volume de pasta de cimento requerido são muito grandes. Neste caso, a cimentação é realizada através da coluna de perfuração, que é descida dentro do revestimento, de forma a reduzir o tempo de contato e o volume de pasta;
- **Multiestágio:** Uma coluna de revestimento pode ser cimentada em estágios múltiplos, nos casos em que esta é muito longa ou quando são atravessadas

formações com características diferentes. Este procedimento reduz o risco de contaminação por fluido de perfuração, diminuindo ainda a possibilidade de fratura da formação;

- **Reversa:** A cimentação consiste em bombear a pasta de cimento pelo anular de tal forma que ele suba pela coluna ao invés do caminho contrário, como é o caso da cimentação convencional. As pressões obtidas são bem menores que em uma cimentação convencional. A principal vantagem desta cimentação é o posicionamento da pasta de cimento em zonas com gradiente de fratura muito baixo sem fraturar a formação;
- **Cimentação em poços com grande lamina d'água:** São os casos de poços marítimos encontrados em profundidades de água entre 300 e 1500 metros e acima dessa extensão. Sob essas condições as formações são fracas e inconsolidadas, a temperatura é baixa e aquíferos podem ser atravessados. A densidade e o regime de fluxo da pasta de cimento deve ser tal que não haja risco de fratura da formação, além disso a pasta deve ser capaz de deslocar o fluido de perfuração e prover um isolamento hidráulico adequado;
- **Cimentação, Alta pressão e Alta Temperatura (HPHT):** Nesta condição, a bainha de cimento deve ter uma resistência suficiente para suportar temperaturas acima de 220°F. Adições são utilizadas para que o material endurecido resista às altas temperaturas e pressões além de outros esforços mecânicos decorrentes desta situação.

2.2.2. Cimentação Secundária

A qualidade da cimentação primária é de fundamental importância para o ciclo de vida de um poço, razão pela qual qualquer deficiência no isolamento irá requerer uma operação de correção, representando na totalidade dos casos um custo adicional no processo de construção do poço.

A cimentação secundária abrange as operações que visam corrigir falhas na cimentação primária, eliminar a entrada de água de uma zona indesejável, reduzir a razão gás/óleo através do isolamento da zona de gás adjacente zona de óleo, abandonar zonas depletadas ou reparar vazamentos na coluna de revestimento.

Devido à variedade de aplicações têm-se as seguintes classificações:

- **Tampões de Cimento:** Consiste no bombeamento para o poço de determinado volume de pasta, cobrindo um trecho do interior do revestimento. São usados nos casos de perda de circulação, abandono total ou parcial do poço, como base para desvios, etc;
- **Recimentação:** É a correção da cimentação primária, quando a pasta de cimento não alcança a altura desejada no anular. A recimentação só é feita quando se consegue circulação pelo anular, pois o revestimento é canhoneado em dois pontos e a circulação é feita através destes canhoneados. Para possibilitar a circulação com retorno, a pasta é bombeada através de coluna de perfuração, dotada de packer (obturador permitindo a pressurização necessária para a movimentação da pasta pelo anular);
- **Compressão de Cimento ou Squeeze:** Consiste na injeção forçada da pasta de cimento sob pressão, visando corrigir localmente a cimentação primária, sanar vazamentos no revestimento ou impedir a produção de água por zonas atravessadas.

2.3. Fatores que Afetam a Cimentação

Diversos fatores podem afetar a qualidade da cimentação, tais como, densidade de pasta para cimentação, fluido de perfuração e reboco, geleificação, perda de filtrado, permeabilidade da pasta, contração volumétrica, fissuração da bainha e aderência do cimento. Portanto, devem-se ter alguns cuidados durante o projeto e execução da cimentação para minimizar os efeitos prejudiciais. Seguem alguns fatores e suas conseqüências:

- **Densidade da Pasta:** A densidade incorreta da pasta de cimento causa um diferencial de pressão podendo permitir a penetração de fluidos em seu interior, que alteram suas propriedades ou não permitem o selamento adequado;
- **Fluido de Perfuração e Reboco:** Quando inadequados permitem um fluxo de gás no anular e também, quando não são removidos adequadamente, podem prejudicar a aderência do cimento à formação;
- **Geleificação:** Uma geleificação da pasta prematura pode causar perda do controle da pressão hidrostática;
- **Perda de Filtrado:** Quando excessiva permite a entrada de gás na coluna da pasta;
- **Permeabilidade da Pasta:** Pasta muito permeável contribui para um baixo isolamento hidráulico e resistência ao fluxo de gás;

- **Contração Volumétrica:** Devido à hidratação do cimento a pasta de cimento sofre um processo natural de contração que permite a migração de fluidos;
- **Fissuração da Bainha:** A bainha do cimento sob tensão pode gerar fraturas e microanulares que permitem a migração de fluidos;
- **Aderência do Cimento:** Uma deficiente interação cimento/revestimento ou cimento/formação pode causar uma inadequada aderência resultando em falha no isolamento.

Além do cuidado com os fatores citados acima, a pasta de cimento necessita de propriedades específicas para ser eficiente em todas as etapas de uma cimentação, desde a fase de projeto até a etapa de pós-colocação anular.

Nas etapas iniciais existem alguns fatores preponderantes, tais como: definição da temperatura de circulação, a escolha de aditivos, conhecimento geológico, características do poço (como geometria do revestimento, inclinação e direção). Todos esses fatores permitem a definição da densidade, controle de filtrado, estabilidade, água livre, tempo de espessamento e desenvolvimento da resistência à compressão adequada à aplicação.

Durante a execução, alguns parâmetros são importantes, tais como: centralização do revestimento no poço; condicionamento do poço resfriando; movimentação da coluna de revestimento por rotação; adequada seqüência de bombeio, para maximizar a colocação anular da pasta de cimento.

Na etapa final, pasta curada, tem grande importância a durabilidade diante dos impactos repetitivos e vibrações que a coluna de revestimento estará submetida, conseqüência de abertura de janelas em poços ou perfuração de poços laterais.

2.3.1. Processo de Deslocamento e Fatores que Afetam sua Eficiência

Uma boa qualidade na cimentação requer que todo fluido de perfuração e reboco existente seja removido garantindo o total preenchimento do anular e adequada aderência da pasta de cimento com a formação. Um deslocamento incompleto do fluido de perfuração gera problemas de canalização entre zonas de interesse, propiciando a comunicação entre elas.

2.3.1.1. Temperatura e Pressão

Temperatura e pressão são fatores de grande importância no deslocamento da pasta, pois sua variação afeta consideravelmente as propriedades da pasta, tais como a

reologia da pasta e o desenvolvimento de resistência à compressão. A temperatura tem efeito mais significativo na mudança dessas propriedades devido ao seu maior incremento na velocidade da hidratação das pastas de cimento.

Assim estimar o valor da temperatura nas diferentes condições do poço tem importância no planejamento da operação, portanto, as temperaturas de circulação, estática e as diferenças de temperatura entre o fundo e o topo do poço devem ser analisado no projeto da pasta.

A temperatura de circulação está diretamente ligada à colocação da pasta, servindo como base para o teste de espessamento e bombeabilidade. Já a temperatura estática está associada ao desenvolvimento da resistência à compressão e à estabilidade.

Os diferenciais de temperatura entre o topo e o fundo da área cimentada são críticos, pois se deve evitar que uma formulação apresente baixo desenvolvimento de resistência à compressão em condições estáticas.

2.3.1.2. Gradiente de Fraturas e de Poros da Formação

Assim como na escolha do fluido de perfuração, para a otimização do peso específico da pasta se deve ter o conhecimento da pressão de fratura da formação abaixo da sapata do revestimento e/ou em algum ponto de formação fraca, levando em consideração a pressão de propagação da fratura por questões de segurança.

Para o caso de menor pressão de fratura, deve-se investigar o desenvolvimento das pressões no anular próximo ao término do deslocamento quando a coluna hidrostática e as perdas de cargas serão máximas. Já no caso de máxima pressão de poros, deve-se observar a passagem de fluidos de menor peso específico em frente à zona de maior pressão. Em casos onde a pressão hidrostática for maior que a pressão de fratura deve-se adotar uma pasta com menor peso específico ou realizar a cimentação em estágios. Já, se a formação for fraturada ou inconsolidada, as densidades requeridas podem ser muito baixas da ordem de 7 lb/gal, então utiliza-se pastas ultraleves com microesferas ocas, microesferas cerâmicas ou pastas espumadas, na qual adiciona-se nitrogênio à pasta.

2.3.1.3. Características do Poço

Um poço com muitos intervalos alargados é prejudicial para a etapa da cimentação, pois dificulta a remoção da lama de perfuração. A lama nessas regiões sofre uma maior geleificação, sendo mais difícil de ser removida pela pasta durante a

cimentação. Assim como poços espiralados tornam mais difícil a centralização do revestimento, o que dificulta a remoção do fluido de perfuração na região anular mais estreita.

2.3.1.4. Propriedades do Fluido de Perfuração

O fluido de perfuração possui características como viscosidade, força gel entre outras que propiciam uma adequada etapa de perfuração, garantindo uma adequada remoção de cascalhos, resfriamento da broca entre outras. Porém, algumas dessas características ótimas para a perfuração prejudicam a cimentação primária.

Para uma cimentação primária adequada, um fluido de perfuração deveria apresentar: baixo valor de viscosidade plástica e limite de escoamento, assim como baixo valor da força gel; baixo peso específico para facilitar o deslocamento da lama; baixo filtrado para prevenir a formação de um trecho de reboco espesso e de difícil remoção; possuir composição química compatível com a pasta de cimento. Ter essas características nem sempre é possível, pois seria muito prejudicial para a perfuração, mas caso as condições sejam favoráveis busca-se garantir boas características para a cimentação primária.

A circulação da lama depois da descida do revestimento é necessária para uma boa cimentação porque assegura que o poço esteja livre de cascalhos, assegura que o fluxo de gás não esteja ocorrendo, homogeneiza a lama, reduz parâmetros de viscosidade plástica e o limite de escoamento, remove a lama geleificada/desidratada de intervalos alargados e avalia as condições hidráulicas do poço. Portanto, uma boa remoção do fluido de perfuração é de grande importância para a etapa de cimentação. A lama de pouca mobilidade e reboco de difícil remoção prejudicam o perfeito condicionamento da pasta de cimentação no anular do poço (ver Figura 1).

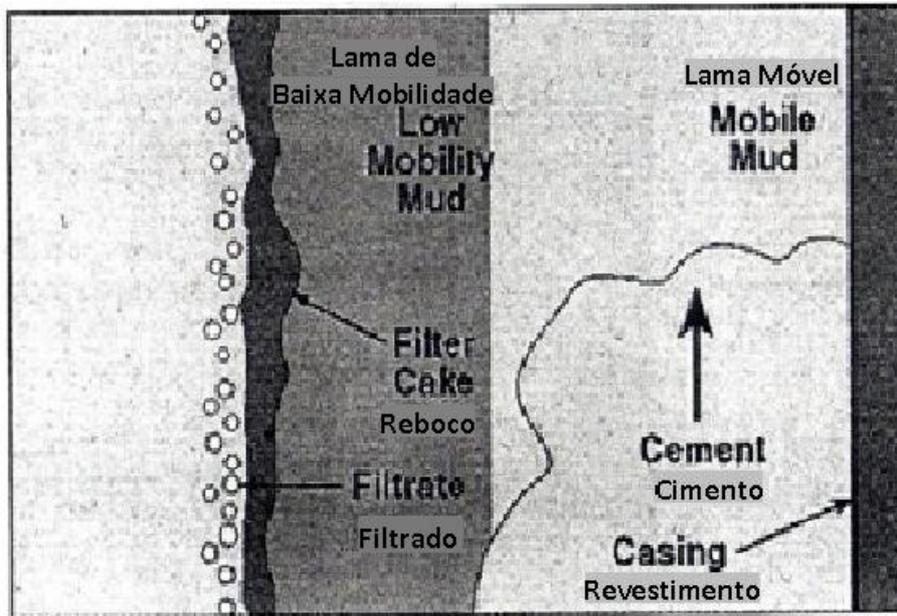


Figura 1. Remoção inadequada dos fluidos do anular (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990).

2.3.1.5. Regime de Fluxo/Vazão de Deslocamento

O melhor regime de fluxo é o turbulento por facilitar o deslocamento do fluido de perfuração e proporcionar uma maior remoção do reboco da parede do poço. As melhores eficiências são obtidas quando a pasta é deslocada com altas vazões sendo mais significativo no deslocamento que o regime de fluxo. Portanto, quando não se pode atingir um fluxo turbulento o ideal é utilizar a maior vazão possível.

2.3.1.6. Centralização do Revestimento

A centralização do revestimento é importante para garantir um fluxo uniforme da pasta pelo anular. Uma centralização inadequada gera canalização, ou seja, torna preferencial a passagem pela parte “larga” do anular, por impor menor resistência ao fluxo, o que pode tornar a parte estreita praticamente imóvel dependendo da diferença das áreas.

Para tanto, se utilizam centralizadores em colunas de revestimento para garantir a maior centralização possível, que devem ser posicionados ao longo da coluna com especial atenção para zonas com possibilidade de prisão, zonas alargadas e zonas onde efetivamente seja requerido o isolamento do poço.

2.3.1.7. Efeito da Queda Livre da Pasta de Cimento

O efeito de queda livre ou tubo em “U” ocorre durante o bombeio do cimento e tem como causa a diferença hidrostática criada pela entrada da pasta de cimento no interior da coluna de revestimento, que é mais densa que o fluido de perfuração no anular. Ocorre uma aceleração de todo o fluido no interior da coluna, fazendo com que a vazão de retorno exceda a vazão de injeção. O que cria uma zona de baixa pressão no topo da coluna, que faz a água da mistura da pasta vaporizar.

Este fenômeno tem como principais influências na cimentação a aceleração da pasta de cimento, gerando maiores pressões ao longo do poço, e sua desaceleração, que gera menos vazões de deslocamento. Para minimizar esses efeitos utilizam-se pastas mais leves, uso de colar de estágio, planejamento da vazão de deslocamento e alteram-se as propriedades reológicas dos fluidos envolvidos.

2.3.1.8. Rotação e Reciprocação

O movimento da coluna de revestimento durante a circulação para condicionamento antes da cimentação, durante a injeção dos diferentes fluidos e do deslocamento da pasta ajuda a quebrar a força gel da lama e a ultrapassar os efeitos da má centralização do revestimento. A movimentação da coluna de revestimento conduz o fluido da parte estreita para a alargada devido à força de arraste criada tende a empurrar promovendo essa movimentação entre a área estreita e a alargada. Deve-se, contudo, observar o torque gerado ao longo da coluna principalmente em poços profundos e horizontais.

2.3.1.9. Uso de Tampão de Topo e de Fundo

Tampões são utilizados para separar os fluidos durante o deslocamento da pasta de cimento. Tem-se um tampão de fundo ou colchão, que é utilizado na frente da pasta, para evitar contaminações com o fluido de perfuração. E o tampão de topo, deslocado imediatamente após a pasta de cimento para prevenir contaminações provocadas pelo fluido deslocado.

2.3.1.10. Colchões Lavadores e Espaçadores

Colchões lavadores e espaçadores ajudam no deslocamento da pasta, pois como são deslocados na frente da pasta de cimento ajuda a separar os fluidos diferentes assim

como aumentam a remoção do fluido de perfuração geleificado permitindo uma maior aderência.

Os colchões lavadores são constituídos à base de água ou óleo, contendo surfactantes e dispersantes, projetados para afinar e dispersar a lama, tendo função predominantemente química.

Os colchões espaçadores são fluidos adensados que além da função química proporcionam forças adicionais de flutuação e de arraste facilitando o deslocamento da lama imóvel.

2.3.2 Principais Falhas

Foram citados inicialmente os principais fatores envolvidos na cimentação de um poço de petróleo, explicando as conseqüências para uma pouca eficiência na cimentação. Porém, eles não são os únicos fatores responsáveis por problemas na cimentação.

A Tabela 1 consiste no resumo das falhas mais comuns durante uma cimentação e de suas causas respectivas. São estas as principais fontes de problemas quando se tem falhas no isolamento.

Tabela 1. Causas de Falha na Cimentação Primária (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990).

CAUSA	TIPO DE FALHA
Contaminantes na água de mistura. Temperatura estimada incorretamente. Desidratação da pasta no anular. Uso de cimento impróprio. Retardador insuficiente. Sapata ou colar obstruídos.	Pega da pasta dentro do revestimento.
Tampão de borracha não liberado . Falha dos equipamentos flutuantes sem ter ocorrido queda de pressão. Cálculos de deslocamentos equivocados. Revestimento partido ou furado.	Tampão de borracha não encontrado, assentado no elemento flutuante.
Falhas mecânicas. Água de mistura ou pressão insuficiente. Falha do sistema de fornecimento do cimento.	Não obtenção do volume de pasta programado para a mistura.
Pressão hidrostática insuficiente. Geleificação da interface lama/pasta. Altura de pasta insuficiente para cobrir formação com gás. Desidratação da pasta.	Gás presente no anular.
Tubo encostado na formação. Altas propriedades reológicas do fluido de perfuração. Falta de movimentação da coluna de revestimento. Poço arrombado.	Canalização.
Água de mistura aquecida. Cimento ou aditivos inadequados para condições do poço. Incompatibilidade química lama/espaçador/pasta. Sub-estimativa da temperatura.	Pega prematura da pasta.

2.4. Sequência Operacional de Cimentação Primária Típica

A operação de cimentação começa com o preparo da pasta a ser utilizada adicionando os aditivos necessários, antes mesmo da conclusão da descida do revestimento. Na Figura 2 podemos ver os equipamentos e a seqüência das operações durante uma cimentação primária típica de poço em terra, nela podemos notar o deslocamento inicial dos fluidos a descida do tampão de fundo e o de topo pelo revestimento e a configuração final de assentamento. Para o prosseguimento da perfuração da fase seguinte os tampões justamente com a camada de cimento no interior do revestimento serão perfurados pela broca da fase seguinte.

Uma cimentação primária típica tem a seguinte seqüência:

- Montagem das linhas de cimentação;
- Circulação para condicionamento do poço e concomitantemente o preparo do colchão de lavagem;
- Injeção do colchão de lavagem;
- Teste das linhas de cimentação;
- Lançamento do tampão de fundo;
- Mistura da 1ª pasta (pasta mais leve);
- Mistura da 2ª pasta (pasta mais pesada que fica próximo a sapata);
- Lançamento do tampão de poço;
- Deslocamento com fluido de perfuração;
- Pressurização do revestimento e teste de estanqueidade do revestimento;
- Em caso de cimentação com sondas marítimas flutuantes deve-se desconectar a ferramenta de assentamento, acionar o elemento de vedação anular e retirar a coluna de assentamento;
- Descida da coluna com broca para corte, das partes internas dos acessórios e da pasta de cimento residual.

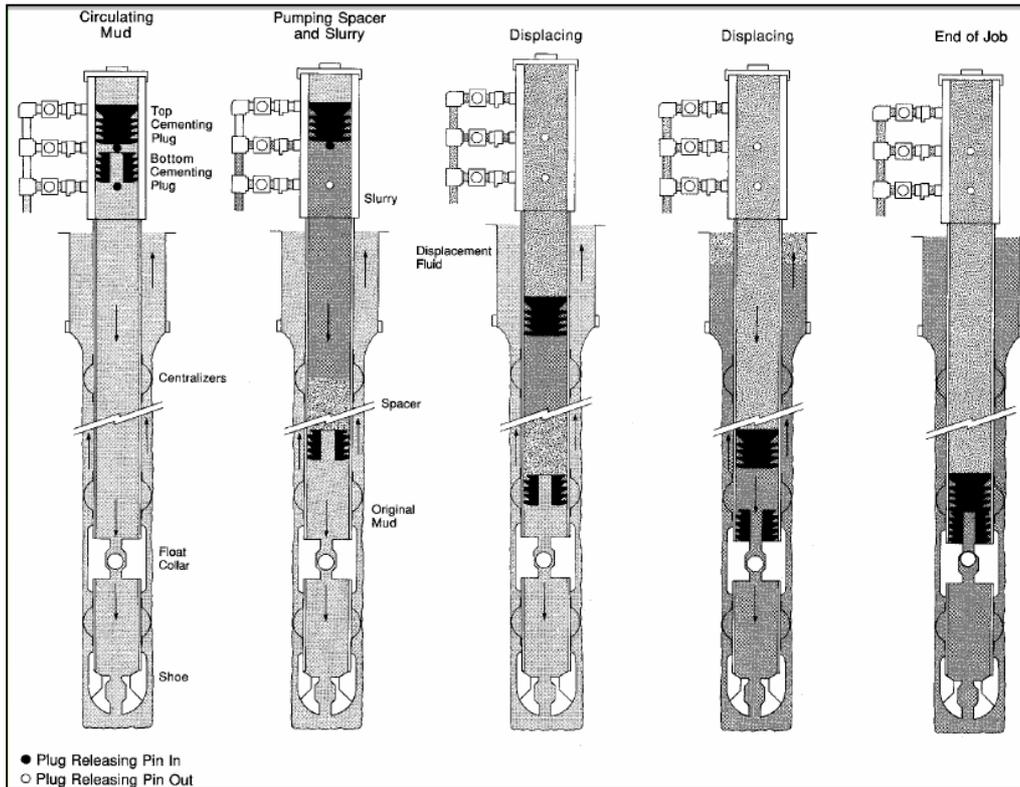


Figura 2. Seqüência Operacional da Cimentação Primária (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990).

Para a cimentação em poços *offshore* de completção molhada, algumas modificações são necessárias no procedimento descrito. O que diferencia a cimentação *offshore* é o posicionamento da cabeça de cimentação posicionada no *drillpipe* no fundo do mar e também a necessidade de um sistema descido junto do revestimento que aloja o *plug* de topo e de fundo, como pode ser visto na Figura 3.

O processo tem início com o lançamento de uma bola de metal, localizada na cabeça de cimentação, que tem o diâmetro adequado para ficar presa somente no *plug* de fundo. Com um aumento da pressão ocorre a quebra do pino de cisalhamento e o *plug* de fundo desce até ficar alojado no collar. Um novo aumento na pressão é necessário para remover a bola lançada, que fica alojada em local apropriado, permitindo assim a circulação da pasta de cimento pelo *plug*. Circula-se a pasta e então é lançado o *dart* que irá alojar-se no *plug* de topo e então teremos um novo aumento de pressão para permitir a quebra do pino de cisalhamento e assim a descida do *plug* de topo até encontrar com o *plug* de fundo.

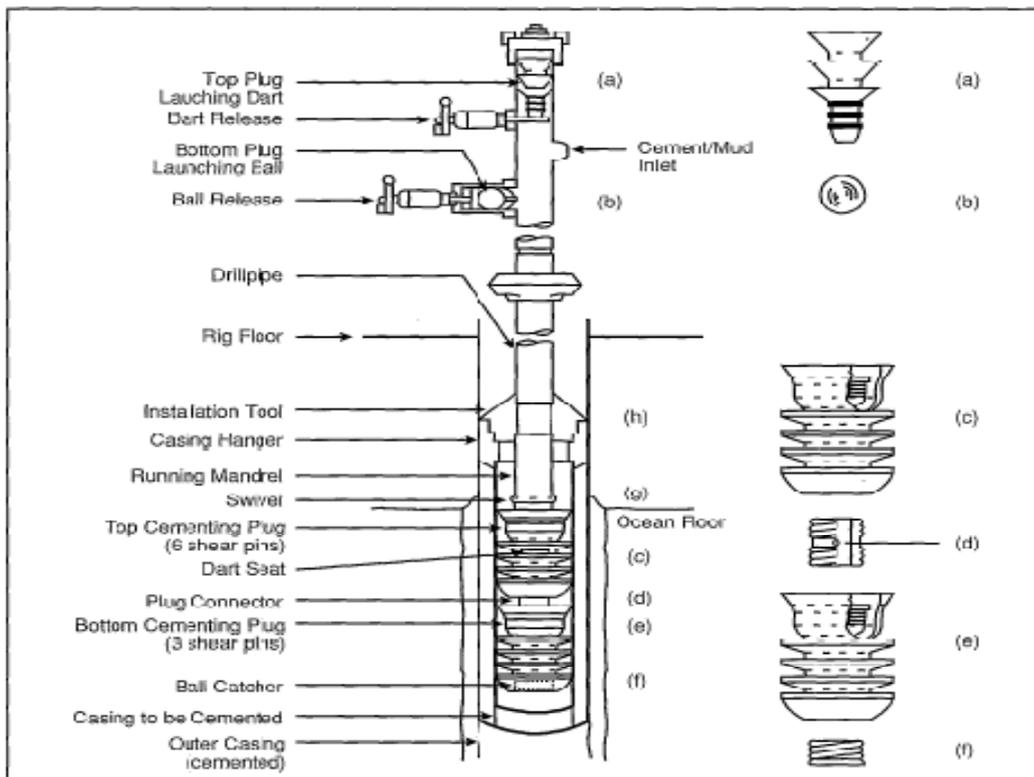


Figura 3. Sistema de Cimentação Submarino (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990).

2.5. Cimento Portland

Cimento, no conceito geral da palavra, pode ser considerado como todo e qualquer material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. Os cimentos que interessam no preparo do concreto têm a propriedade de endurecer na presença de água. Isso ocorre devido a reações químicas. Esses cimentos são constituídos principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio e podem ser classificados como cimentos naturais, cimento Portland e cimentos aluminosos.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), cimento Portland é um aglomerado hidráulico obtido pela moagem de clínquer portland com adição, durante a moagem, de pequena quantidade de sulfato de cálcio (gesso) para regular o tempo do início de hidratação dos componentes (tempo inicial de pega). O clínquer do cimento Portland pode ser definido como um produto granulado, obtido por tratamento térmico até o abrandamento e sinterização de mistura adequada de calcário e argila. É um produto constituído na sua maior parte por silicatos (aproximadamente 75%) e em proporções menores de aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos, dosados de

maneira a constituir uma proporção conveniente de cal (CaO), sílica (SiO₂) e proporções menores de alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃).

2.5.1. Processo de Fabricação

O processo de fabricação (Figura 4) do cimento Portland consiste basicamente em moer a matéria prima, misturá-la intimamente nas proporções adequadas e queimar essa mistura em um forno rotativo até a temperatura de cerca de 1450 °C. Nessa temperatura, o material sofre uma fusão incipiente formando pelotas, conhecidas como clínquer. O clínquer é resfriado e moído até um pó bem fino com a adição de um pouco de gesso, resultando no cimento Portland comercial.

A mistura e moagem das matérias primas podem ser realizadas via seca ou via úmida.

- Processo de Fabricação Via Úmida
 - Vantagens
 - Menor poluição
 - Facilidade no controle do processo
 - Desvantagens
 - Maior consumo energético
 - Maior custo
- Processo de Fabricação Via Seca
 - Vantagens
 - Menor consumo energético
 - Menor custo
 - Desvantagens
 - Maior poluição
 - Dificuldade no controle do processo

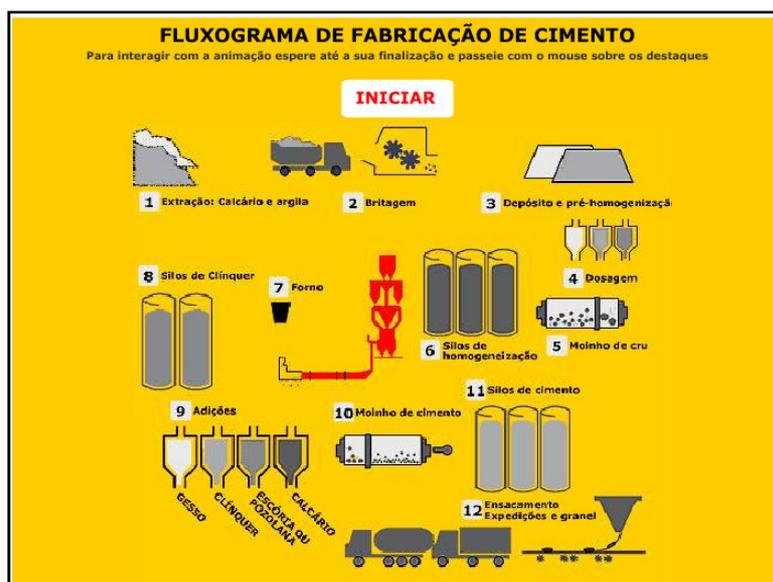


Figura 4. Esquema da Fabricação de Cimento (Fonte: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao>).

2.5.2. Composição Química

Os principais constituintes do cimento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Principais Constituintes do Cimento (Fonte: Petrucci, 1984).

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviação
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Além dos compostos relacionados na Tabela 2, existem compostos secundários, como MgO , TiO_2 , MnO_2 , K_2O e Na_2O . Esses compostos representam um pequeno percentual da massa de cimento. Porém, dois desses compostos apresentam características importantes. Os óxidos de sódio e de potássio, Na_2O e K_2O (também conhecidos como *álcalis* – embora existam outros *álcalis* no cimento). Estes óxidos reagem com alguns agregados, de modo que os produtos desta reação provocam a desintegração do concreto, e também se constatou que eles influenciam a velocidade de aumento de resistência do cimento.

2.5.3. Hidratação do Cimento Portland

As reações que fazem com que o cimento se torne um agente ligante ocorrem entre a água e o cimento. Na presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente que consiste na pasta de cimento endurecida.

Le Chatelier observou que os produtos de hidratação do cimento são os mesmos obtidos com a hidratação em separado dos componentes em condições similares. Isso foi confirmado posteriormente por Steinour, Bogue e Lerch, com a observação de que os produtos das reações podem reagir entre si ou com outros componentes do sistema. Os dois silicatos de cálcio são os compostos mais importantes do cimento e o comportamento físico do cimento durante a hidratação é semelhante aos desses dois compostos isolados (Petrucci, 1984).

Os produtos de hidratação do cimento são pouco solúveis em água. Isto é evidenciado pela estabilidade da pasta de cimento hidratada em contato com a água. O cimento hidratado adere firmemente ao cimento que não reagiu, mas não é conhecido o mecanismo exato de como isso ocorre.

A velocidade de hidratação decresce continuamente com o passar do tempo de tal modo que, mesmo após dias, permanecerá uma quantidade de cimento não hidratado.

Os principais produtos de hidratação podem ser classificados, de uma maneira geral, em silicatos de cálcio hidratado e aluminato tricálcico.

A evolução da reação de hidratação do cimento depende dos seguintes fatores:

1. Taxa de dissolução das fases envolvidas;
2. Taxa de nucleação e de crescimento dos cristais de hidratos formados;
3. Taxa de difusão da água e de íons dissolvidos através dos materiais hidratados que são continuamente formados.

A reação de hidratação é exotérmica e o mecanismo de reação na temperatura ambiente é caracterizado em cinco estágios diferentes. Estes estágios estão representados graficamente na Figura 5.

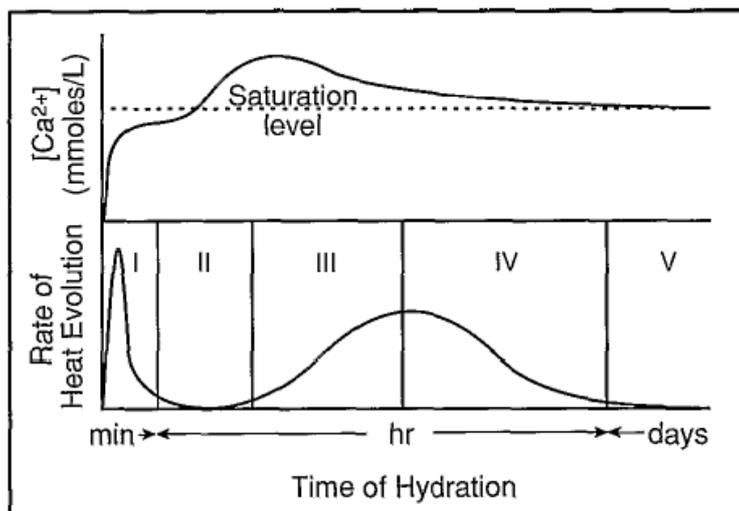


Figura 5. Etapas da Hidratação do Cimento (Fonte: Well Cementing, Schlumberger, 1990).

No primeiro estágio, denominado período de pré-indução, há uma rápida evolução de calor assim que o cimento entra em contato com a água. A principal característica desta fase é que a rápida taxa de hidratação inicial vai diminuindo progressivamente à medida que os produtos de hidratação são precipitados sobre a superfície dos grãos de cimento.

No segundo estágio, denominado período de indução ou dormência, a taxa de hidratação de todos os minerais presentes no clínquer é lenta extendendo-se por algumas horas. Neste estágio, a pasta de cimento torna-se plástica e ganha trabalhabilidade.

No terceiro estágio, denominado período de aceleração ou pega, a reação é acelerada com o tempo e a taxa de liberação de calor atinge seu máximo, sendo que a pega inicial do cimento ocorre durante este período.

No quarto e quinto estágios, denominados período de pós-indução e endurecimento respectivamente, a taxa de hidratação do material ainda não reagido diminui gradualmente e o processo de hidratação passa a ser controlado por difusão. Nesta fase ocorre uma desaceleração da reação e a taxa de calor liberado é reduzida.

Como regra geral, o processo de pega do cimento Portland é uma combinação de reações de solução/precipitação em que minerais solúveis dissolvem em água para produzir hidratos de baixa solubilidade, que então precipitam de soluções supersaturadas. A nucleação e crescimento destes hidratos é uma característica essencial do processo de pega.

2.5.3.1. Silicatos de Cálcio Hidratados

Quando ocorre a hidratação, com uma quantidade limitada de água, como no caso da pasta de cimento, acredita-se que o C_3S sofra hidrólise, produzindo um silicato de cálcio com basicidade menor e, no fim, $C_3S_2H_3$, liberando cal na forma de $Ca(OH)_2$.

A relação C/S é afetada se parte da cal fosse absorvida ou retida na solução sólida e existe forte indicação de que o produto final da hidratação do C_2S tenha uma relação cal/sílica de 1,65. Isso pode ser devido ao fato de que a hidratação do C_3S é controlada pela velocidade de difusão de íons através das camadas sobrejacentes do produto hidratado, ao passo que a hidratação do C_2S é controlada pela sua baixa velocidade intrínseca de reação. Além disso, a temperatura pode ter influência sobre os produtos da hidratação dos silicatos, pois a permeabilidade do gel é alterada pela temperatura.

A relação também varia com o tempo e é influenciada pela presença de outros elementos ou compostos no cimento. Como os cristais formados na hidratação são imperfeitos e muito pequenos, a relação molar entre a água e sílica não é necessariamente de um número inteiro.

Na suposição aproximada de que o $C_3S_2H_3$ seja o produto final da hidratação do C_3S e do C_2S , as reações de hidratação podem ser escritas para orientação como segue:

Para o C_3S :



As massas correspondentes envolvidas são:

$$100 + 24 \Rightarrow 75 + 49$$

Para o C_2S :



As massas correspondentes são:

$$100 + 21 \Rightarrow 99 + 22$$

Com base nas massas, ambos silicatos necessitam aproximadamente da mesma quantidade de água para hidratação, porém o C_3S produz uma quantidade maior de hidróxido de cálcio. Porém estas equações não podem ser consideradas equações estequiométricas exatas.

As propriedades físicas dos silicatos de cálcio hidratados interessam no que se refere às propriedades de pega e endurecimento do cimento. Estes compostos são aparentemente amorfos, mas a microscopia eletrônica mostra o seu caráter cristalino.

Os silicatos de cálcio não se hidratam no estado sólido, mas os silicatos anidros provavelmente, se dissolvem antes para depois reagirem formando silicatos hidratados menos solúveis que se precipitam da solução supersaturada. Este é o mecanismo de hidratação imaginado por Le Chatelier em 1881.

Estudos de Diamond (Petrucci, 1984) indicam que os silicatos de cálcio hidratados se apresentam sob várias formas: partículas fibrosas, partículas planas, partículas achatadas, malha reticulada, grãos irregulares, todas difíceis de serem definidas. No entanto, a forma predominante é a de partículas fibrosas, possivelmente maciças, possivelmente ocas, algumas vezes achatadas, algumas vezes se ramificando nas extremidades. A estrutura dos silicatos de cálcio hidratados é muito desordenada para ser definida pelas técnicas disponíveis.

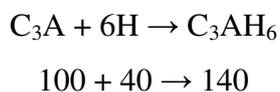
A hidratação do C_3S de um modo geral caracteriza o comportamento do cimento e a sua descrição pode ser conveniente. A hidratação não se processa a uma velocidade constante e nem mesmo a uma velocidade com variação constante. A liberação inicial rápida de hidróxido de cálcio para solução deixa uma camada externa de silicato de cálcio hidratado. Esta camada dificulta a hidratação subsequente, de modo que por algum tempo, a hidratação fica lenta.

Como a hidratação do cimento é uma reação exotérmica, a velocidade do desprendimento de calor é uma indicação da velocidade de hidratação. Isso mostra que existem três picos na velocidade de hidratação aproximadamente nos primeiros três dias, desde que o cimento tenha entrado em contato com a água.

2.5.3.2. Aluminato Tricálcico e a Ação do Gesso

A quantidade de C_3A presente na maioria dos cimentos é relativamente muito pequena, mas o seu comportamento e a sua relação estrutural com outras fases o tornam interessante. O aluminato de cálcio hidratado forma um material primático intersticial, possivelmente com outras substâncias em solução sólida e muitas vezes na forma de placas achatadas rodeadas pelos silicatos de cálcio hidratados.

A forma estável final do aluminato de cálcio presente na pasta de cimento hidratada é, provavelmente, o cristal cúbico C_3AH_6 , mas é possível que o C_4AH_{12} cristalize antes na forma hexagonal depois passe para a forma cúbica. Assim, a reação na sua forma final pode ser escrita da seguinte forma:



Esta é uma aproximação e não uma equação estequiométrica exata.

A presença do C_3A no cimento é indesejável, pois contribui pouco para a resistência do cimento, exceto às primeiras idades e, quando o cimento endurecido é atacado por sulfatos, uma expansão devido à formação de sulfoaluminatos a partir do C_3A pode resultar uma desagregação da pasta endurecida. Porém, um efeito positivo da presença do C_3A no cimento é sua capacidade de fixação de íons de cloreto. Esses íons podem estar presentes nas zonas perfuradas e são responsáveis por corrosões localizadas no cimento.

No processo de fabricação do cimento adiciona-se gesso a fim de aumentar o tempo de pega do cimento, que sem esta adição seria de poucos minutos. Desta forma, a adição de gesso tem por finalidade retardar as reações de hidratação do cimento. A quantidade de gesso a ser adicionada ao clínquer de cimento deve ser cuidadosamente observada porque um excesso de gesso leva a uma expansão e conseqüente desagregação da pasta de cimento. O despreendimento de calor de hidratação determina o teor ótimo. O primeiro pico na velocidade da evolução do calor é seguido por um segundo pico cerca de 4 a 10 horas após a adição de água ao cimento, e com a quantidade correta de gesso deve haver pouco C_3A disponível para a reação após todo o gesso ser combinado, e não deve ocorrer outro pico. Desta forma, um teor ótimo de gesso resulta em uma velocidade desejável da reação nos primeiros estágios e evita elevada concentração local de produtos de hidratação. Como conseqüência, se reduz o tamanho dos poros da pasta de cimento e se aumenta a resistência.

A evolução da hidratação do cimento pode ser determinada das seguintes maneiras:

- a) Quantidade de $Ca(OH)_2$ na pasta;
- b) Calor desenvolvido na hidratação;
- c) Massa específica da pasta;
- d) Quantidade de água quimicamente combinada;
- e) Quantidade de cimento não hidratado presente, usando-se análise quantitativa com raios X;
- f) Indiretamente, pela resistência da pasta hidratada.

Para estudar as primeiras reações podem ser utilizadas técnicas termogravimétricas e difração por varredura contínua de raios X de pastas frescas em processo de hidratação.

2.5.4. Pega do Cimento

Este termo faz referência ao enrijecimento da pasta de cimento. Em termos gerais, pega se refere à mudança do estado fluido para o estado rígido. Embora durante a pega a pasta adquira certa resistência, para efeitos práticos, é importante distinguir pega de endurecimento, que se refere ao aumento de resistência de uma pasta de cimento depois da pega.

O tempo de pega do cimento diminui com o aumento da temperatura, mas acima de cerca de 30°C, pode-se observar o efeito inverso. Em temperaturas baixas a pega é retardada.

O início da pega corresponde a um aumento brusco da consistência da pasta e uma elevação de sua temperatura. O “fim da pega” é convencionado se situar quando a pasta cessa de ser deformável para pequenas cargas e se torna um bloco rígido. Daí em diante, a massa de cimento continua a aumentar a coesão e a resistência entrando a fase de endurecimento.

Para cada tipo de clínquer existe uma quantidade ótima de gesso a adicionar para retardar a pega. Esta quantidade é função do teor de C_3A , por reagir mais rapidamente com a água, do percentual de álcalis e do grau de moagem.

O processo de pega pode ser descrito da seguinte forma: *“a reação com a água produz rapidamente uma capa superficial de produtos de hidratação envolvendo cada partícula. Os produtos de hidratação ocupam um espaço maior, em parte as expensas das partículas e em parte às expensas do líquido, todavia, com dimensões ainda coloidais, apesar de haver cristais maiores de hidróxido de cálcio. Com o progresso da reação, as camadas dos produtos de hidratação se estendem e começam a se unir de tal maneira que se forma um gel nos espaços intergranulares, correspondendo à fase plástica da pasta. À medida que a reação progride, as partículas existentes entre os grãos aumentam e vão se apertando progressivamente, até que o material possa ser considerado como uma massa de partículas em contato mútuo. As partículas cristalinas estão disseminadas através de gel, e também se formam nos poros por recristalização. Com o tempo todo o gel se cristaliza e o cimento endurece”*. (Petrucci, 1984).

2.5.5. Cimento Classe G e Especial

O *American Petroleum Institute (API)* padronizou os processos de fabricação e composição química em 8 classes, de A até H, cujas propriedades diferem quanto à

faixa de aplicação (temperatura e pressão), à sua resistência inicial e retardamento, à resistência ao ataque de sulfatos e ao calor de hidratação.

Os cimentos Classe G e Especial são os mais utilizados na cimentação de poços petrolíferos. Estes cimentos podem ser definidos, conforme descrito na norma NBR 9831 da ABNT, como:

“Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio hidráulicos e que apresenta características especiais para uso em poços de petróleo até a profundidade de 2440 m, assim como produzido. A única adição permitida durante a moagem nestes dois tipos de cimento é a de gesso”. (NBR 9831).

A seguir, tem-se uma descrição das diferentes classes segundo a API *Specification* 104 (2002).

- **Classe A**

Utilizado em profundidades de até 1830 metros (6000 pés) quando não há necessidades de propriedades especiais.

- **Classe B**

Utilizado em profundidades de até 1830 metros (6000 pés) em condições onde há necessidade de moderada a alta resistência a sulfato.

- **Classe C**

Utilizado em profundidades de até 1830 metros (6000 pés) em condições onde há a necessidade de uma alta resistência à compressão inicial e de alta resistência a sulfato.

- **Classe D**

Utilizado em profundidades de 1830 metros (6000 pés) a 3050 metros (10.000 pés) sob condições de pressões e temperaturas moderadas a altas. Pode apresentar moderada ou alta resistência a sulfato.

- **Classe E**

Utilizado em profundidades de 3050 metros (10.000 pés) a 4270 metros (14.000 pés) sob condições de pressões e temperaturas altas. Pode apresentar moderada ou alta resistência a sulfato.

- **Classe F**

Utilizado em profundidades de 3050 metros (10.000 pés) a 4880 metros (16.000 pés) sob condições de pressões e temperaturas extremamente altas. Pode apresentar moderada ou alta resistência a sulfato.

- **Classe G e H**

Utilizados em operações básicas de cimentação de poços de petróleo de revestimentos de superfície até a profundidade de 2440 metros (8.000 pés), podendo ainda ser utilizado com uma série de aditivos químicos como aceleradores e retardadores de modo a contemplar uma série de aplicações distintas a depender da profundidade e temperatura. Pode ter moderada a alta resistência a sulfato.

As especificações dos cimentos Classe G e Especial estão descritos na norma NBR 9831 como requisitos químicos e requisitos físicos.

Os requisitos físicos estão listados na Tabela 3. As propriedades reológicas estão relacionadas na Tabela 4. E os requisitos químicos estão listados na Tabela 5.

Tabela 3. Requisitos Físicos dos Cimentos Classes G e especial (Fonte: NBR 9831).

Requisitos Físicos		CPP - Classe G	CPP - Classe Especial
Relação Água/Cimento (em massa)		0,44	0,46
Água Livre Máxima		5,90%	5,90%
Resistência à compressão mínima	Cura 38°C	2,1 Mpa (300 psi)	2,1 Mpa (300psi)
	Cura 36°C	10,3 Mpa (1500 psi)	10,3 Mpa (1500 psi)
Tempo de Espessamento	Limite Inferior	90 min	90 min
	Limite Superior	120 min	120 min
Consistência no período de 15 min a 30 min de ensaio max.		30 Uc	30 Uc

Tabela 4. Propriedades Reológicas dos Cimentos Classes G e Especial (Fonte: NBR 9831).

Propriedades Reológicas	CPP - classe G	CPP - classe especial
Gel Inicial (GI) a 3 rpm, após parada de 10 s	12 Pa	12 Pa
Gel Final (GF) a 3 rpm, após parada de 10 s	16,8 Pa	16,8 Pa
Viscosidade Plástica (VP)	0,055 Pa.s	0,055 Pa.s
Limite de Escoamento (LE) à Temperatura de 27°C	14,4 a 38,3 Pa	14,4 a 33,5 Pa
Limite de Escoamento (LE) à Temperatura de 52°C	14,4 a 38,3 Pa	14,4 a 33,5 Pa

Tabela 5. Requisitos Químicos dos Cimentos Classes G e Especial (Fonte: NBR 9831).

Requisitos Químicos %			CPP - classe G	CPP - classe especial	Métodos de Ensaio
Denominação	Fórmula Química	Símbolo	ARS	MRS	
Óxido de Mágnésio	MgO	-	6,0	6,0	ABNT NBR NM 11-2, ABNT NBR NM 14
Trióxido de Enxofre Máx.	SO ₃	-	3,0	3,0	ABNT NBR NM 16, ABNT NBR 14656
Perda ao fogo Máx.	-	PF	3,0	2,0	ABNT NBR NM 18
Resíduo Insolúvel Máx.	-	RI	0,75	0,75	ABNT NBR NM 15
Cal Livre Máx.	CaO	CaO	2,0	1,6	ABNT NBR NM 13
Silicato Tricálcico Máx.	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	65	60	ABNT NBR NM 14
Silicato Tricálcico Min.	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	48	50	ABNT NBR NM 14
Aluminato Tricálcio Máx.	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	3,0	7,0	ABNT NBR NM 14
Ferro Aluminato tetracálcio mais o dobro do aluminato tricálcio Máx.	4.CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ + 2(3CaO.Al ₂ O ₃)	C ₄ AF + 2C ₃ A	24	24	ABNT NBR NM 14
Equivalente alcalino total expresso como Na ₂ O equivalente Máx.	-	Na ₂ O _{eq}	0,75	0,85	ABNT NBR NM 17

2.5.6. Relações entre as Composições Química e Física do Cimento Classe G e Especial com as Principais Propriedades da Pasta Pura

As propriedades físicas das pastas de cimento Classes G e Especial, dependem das características das fases mineralógicas do clínquer, da composição química do cimento, da superfície específica Blaine e distribuição granulométrica de suas partículas. A presença de elementos químicos menores pode alterar a reatividade dos mesmos. Entretanto, podem-se observar tendências gerais devido à concentração de determinada fase no principal composto do cimento (clínquer).

2.5.6.1. Aluminato Tricálcico (C_3A)

Quando se apresenta cristalizado devido a um resfriamento lento do clínquer ao sair do forno, tem formato cúbico. O C_3A forma soluções sólidas com Fe_2O_3 , MgO e álcalis (Na_2O). A presença de álcalis faz com que o C_3A cristalize em forma acicular.

É o composto do cimento que apresenta maior velocidade de hidratação, isto é, principal responsável pela pega do cimento, pois reage rapidamente com a água. Assim, este composto, juntamente com o C_3S , confere ao cimento a resistência inicial à solicitações mecânicas. É o composto que apresenta o maior calor de hidratação.

O desenvolvimento das resistências do C_3S no início da pega, e o endurecimento do cimento, dependem do C_3A , todavia, resulta em propriedades indesejáveis à pasta (baixa resistência a sulfato e variação volumétrica), com o conseqüente aumento de calor de hidratação.

Embora seja o composto de menor concentração no cimento Classe G, a sua função é de grande importância, já que juntamente com o gesso é um dos principais responsáveis pelo controle do tempo de pega e pela suscetibilidade ao ataque de águas sulfatadas. O seu teor é inversamente proporcional ao tempo de espessamento e ao percentual de água livre, e diretamente proporcional à viscosidade, ao limite de escoamento, ao gel inicial e final e a resistência à compressão.

2.5.6.2. Silicato Tricálcico (C_3S)

Também conhecido como Alita, o C_3S pode formar compostos sólidos com os elementos Al, Fe, Mg, Na, K, Mn, Cr, Ti e F, tendo esses ou alguns desses elementos em forma de óxido, até cerca de 3% de sua composição. Apresenta-se, em geral, na forma hexagonal.

Durante o resfriamento do clínquer, este pode se decompor em C_2S e cal livre, o que torna o clínquer defeituoso e em consequência, o cimento com desempenho inferior.

É o principal responsável pelas propriedades hidráulicas e mecânicas do cimento, pois reage rapidamente com a água provocando uma imediata liberação de calor e elevada resistência inicial.

É o composto de maior concentração no cimento Classe G. Depois do C_3A é o que apresenta maior velocidade de hidratação e, portanto, também é responsável pela resistência mecânica inicial do cimento. A sua concentração é inversamente proporcional ao tempo de espessamento e ao percentual de água livre, e diretamente proporcional à viscosidade, ao limite de escoamento, ao gel inicial e final e à resistência à compressão.

2.5.6.3. Ferro-Aluminato Tetracálcico (C_4AF)

Também conhecido como *Brownmillerite* ou Ferrita, possui velocidade de hidratação mais lenta que C_3A . Constitui, juntamente com o C_3A a fase intersticial do clínquer, não sendo um composto definido, mas uma solução sólida variando de C_2F a C_8A_3F .

2.5.6.4. Silicato Bicálcico (C_2S)

Também conhecido como Belita é o composto do cimento que apresenta menor velocidade de hidratação. Este composto exerce pouca influência sobre as propriedades físicas das pastas de cimento Classe G. É frequentemente encontrado na forma arredondada. Sua principal característica é a resistência à corrosão química do cimento.

2.5.6.5. Perda ao Fogo (%)

Perda de massa por calcinação à 950 °C. Indica o início da hidratação do cimento ou presença de CaO_3 , por adição ao cimento ou por recarbonatação da CaO livre.

2.5.6.6. Resíduo Insolúvel (%)

Porção do cimento que não é solúvel em ácido clorídrico diluído à 10% em ebulição. Indica a quantidade de componentes não hidráulicos no cimento.

2.5.6.7. SO₃ (%)

Utilizado como indicador da quantidade de gesso (regulador do tempo de pega) adicionado ao cimento.

2.5.6.8. CaOlivre (%)

Teor controlado por ser expansivo. Este componente decorre da não combinação integral das matérias primas durante a clínquerização. Indica a extensão de sua reação com o CO₂ do ar (recarbonatação) quando comparado com o teor no cimento recém produzido. Este teor consiste em uma medida da deficiência da fabricação.

2.5.6.9. MgO (%)

A magnésia (MgO) possui o teor controlado por ser expansivo. Este composto pode ocorrer nos clínqueres tanto em soluções sólidas (não prejudicial) como, se em quantidades importantes, aparecer na forma cristalina, denominada periclásio (prejudicial por tender a hidratar ainda mais lentamente do que o cal livre).

2.5.6.10. Equivalente Alcalino (%)

Teor controlado porque, em contato com agregados reativos, os álcalis formam compostos expansivos.

2.6. Pastas para Cimentação

As pastas de cimento são projetadas para atender às exigências em três situações distintas, quais sejam: sua preparação, deslocamento e pós-colocação no anular. Para cada uma serão solicitados valores específicos de suas propriedades estáticas e dinâmicas. E deve-se atender a essas propriedades para se obter uma mistura fácil dos componentes na superfície, um deslocamento contínuo sem crescimento exacerbado das pressões anulares, bem com uma rápida evolução da resistência compressiva depois de assentada na posição desejada.

O projeto de uma operação de cimentação tem como etapa imprescindível a realização de testes laboratoriais, que visam a determinação de suas propriedades físicas, estáticas e dinâmicas. O valor de cada uma dessas propriedades é dependente das demais influenciando no resultado da pasta final, portanto, não existindo um valor determinado para cada propriedade isolada. Deve-se levar em consideração uma relação equilibrada entre os valores de cada uma das propriedades.

Na etapa da mistura temos a união de diferentes materiais que passarão por progressivas modificações e, portanto, deve manter a bombeabilidade. Verifica-se, então, que as propriedades reológicas como a viscosidade aparente e a força gel, têm papel preponderante nessa etapa relativa à mistura dos componentes da pasta na superfície.

Durante o deslocamento as propriedades da pasta devem ser tais que possibilitem o deslocamento desde o equipamento de superfície, onde está sendo misturada, até a posição programada no anular. Nessa etapa a pasta estará submetida a diversas dificuldades, entre eles vale destacar que pode ocorrer contaminação da pasta com outros fluidos do poço o que ocasionará uma série de efeitos indesejáveis, podendo até mesmo impedir o deslocamento da pasta. Também pode ocorrer excessiva perda de fluido para a formação, o que pode ocasionar o total desajuste dos valores ótimos projetados para a pasta evitar se utiliza aditivos controladores de filtrado.

Na última etapa, pós-colocação, se espera de uma pasta para cimentação que ela desenvolva, o mais rapidamente possível, resistência à compressão mínima para que se possam retornar as operações no poço. E por isso as propriedades mais exigidas nessa etapa são as relativas ao desenvolvimento do gel estático e de resistência à compressão.

2.7. Aditivos

Denominam-se aditivos os compostos químicos adicionados à pasta de cimento visando sua adequação às necessidades do poço. Suas concentrações são determinadas por testes em laboratórios. Esses aditivos podem ser adicionados em estado sólido ou líquido. É importante observar que um aditivo costuma afetar diferentes aspectos da pasta, portanto todas essas variáveis devem ser observadas na hora da escolha da composição do aditivo. Porém um aditivo é classificado de acordo com o efeito principal que causa na pasta de cimentação. A seguir temos as classificações dos aditivos.

2.7.1. Aceleradores

Atuam diretamente na hidratação do cimento com o objetivo de diminuir o tempo de espessamento e aumentar a resistência compressiva inicial da pasta, portanto, são utilizados principalmente para diminuir o tempo de espera para se retomar a operação que pode ocorrer com uma resistência compressiva mínima de 500 psi retomam-se as atividades. O mais comum é o cloreto de cálcio (CaCl_2), em proporção

de 0,5 a 2% juntamente com o cloreto de sódio (NaCl). O mecanismo de funcionamento baseia-se no aumento do caráter iônico da fase aquosa, fazendo com que os principais componentes do cimento seco se hidratem e liberem o Ca(OH)_2 mais rapidamente, tendo uma rápida formação do CSH, principal responsável pela resistência da pasta de cimento.

2.7.2. Retardadores

Para maiores profundidades e formações com maiores temperaturas são utilizados os retardadores de pega para ganhar maior tempo de bombeio. Os retardadores são fabricados à base de lignossulfonatos (polímeros não refinados) e seus derivados, ácidos orgânicos (ácidos hidrocarboxílicos), derivados de celulose e derivados de glicose. Permitem o retardamento do início da pega da pasta para permitir o deslocamento da pasta quando a temperatura e a pressão são muito altas. Eles inibem a precipitação do hidróxido de cálcio seja formando um complexo químico com componentes do cimento não hidratado, seja formando uma camada protetora para os grãos não hidratados, para prevenir o contato com a água.

2.7.3. Estendedores

São utilizados para reduzir a densidade e permitir obter maior rendimento da pasta, resultando em pastas mais leves, possibilitando maiores alturas de pasta devido a menor pressão hidrostática. Podem funcionar por absorção de água (argilas, como a bentonita, ou produtos químicos, como silicatos) ou pela adição de agregados de baixa densidade (pozolana, perlita, gilsonita). Em casos especiais pode-se usar nitrogênio ou microesferas ocas para criar pastas excepcionalmente leves.

2.7.4. Dispersantes

Eles baixam a viscosidade aparente o limite de escoamento e a força gel das pastas, e conseqüentemente permitem adoção de maiores vazões com menores perdas de carga, causando melhor remoção do fluido de perfuração e um menor risco de fratura de formações. Os sulfonatos são os dispersantes mais comuns, e o mais usado é o sulfonato polinaftalênico. São usados secundariamente como um meio de obter pastas mais pesadas, compensando a viscosificação que ocorre com a diminuição do teor de água da pasta. A dispersão é obtida quebrando mecanicamente a suspensão ou pela modificação química das interações eletrostáticas, produzindo partículas carregadas eletricamente,

que se repelem, por terem a mesma carga. Um efeito indesejado do dispersante é o aumento do teor de água livre e decantação de sólidos.

2.7.5. Controladores de filtrado

Têm a função de evitar a desidratação prematura da pasta frente às zonas permeáveis, mantendo a bombeabilidade e impedindo que cause danos à formação produtora. Há duas classes de controladores de filtrado: materiais finamente divididos e polímeros solúveis em água, que são os mais utilizados. Os polímeros atuam diminuindo a permeabilidade do reboco de cimento criado e/ou aumentando a viscosidade do filtrado. Como um dos fatores que afeta o controle de filtrado da pasta é seu grau de dispersão, os controladores de filtrado são sempre usados simultaneamente com os dispersantes.

2.7.6. Controladores de perda de circulação

Zonas fraturadas ou com alta permeabilidade ocasiona perda de fluido para a formação. Nessas situações é conveniente adicionar ao cimento agentes granulares, fibrosos, aceleradores de pega ou tixotrópicos. Estes reduzem a perda de circulação por facilitarem criações de pontes. Deve-se tomar cuidado com o material que será utilizado para não ocorrer entupimento dos equipamentos dentro do poço, por exemplo, no colar causando sérios prejuízos para a cimentação.

2.7.7. Adensantes

Pastas de alta densidade são utilizadas em poços de alta pressão, nos quais um aumento no peso hidrostático se faz necessário para igualar à pressão da formação e prevenir a invasão de gás ou fluido. As adições utilizadas para se aumentar a densidade costumam ser areia, baritina, hematita e/ou sal dissolvido na pasta, sendo a baritina o aditivo mais utilizado para ganho de peso da pasta.

2.7.8. Outros

Além dos aditivos citados acima, podem ser utilizados outros aditivos como os antiespumantes, para evitar aeração da pasta, os controladores de perda de circulação, os descontaminantes, os traçadores radioativos e corantes para se detectar a presença do cimento e as sílicas cristalinas (areia de sílica e o pó de sílica) para evitar a retrogressão da resistência da pasta a altas temperaturas (mais de 230°F).

2.8. Equipamentos da Cimentação

A Figura 6 mostra a configuração típica de um sistema de cimentação. Podemos observar que inicialmente se mistura água devidamente tratada e medida com quantidade calculada dos aditivos necessários para a pasta. A solução é misturada e enviada para o misturador de cimento, é adicionada quantidade extra de água para se ajustar o razão cimento-água e mistura e então enviada para o tanque de armazenamento para ser bombeada com a pressão desejada para o poço.

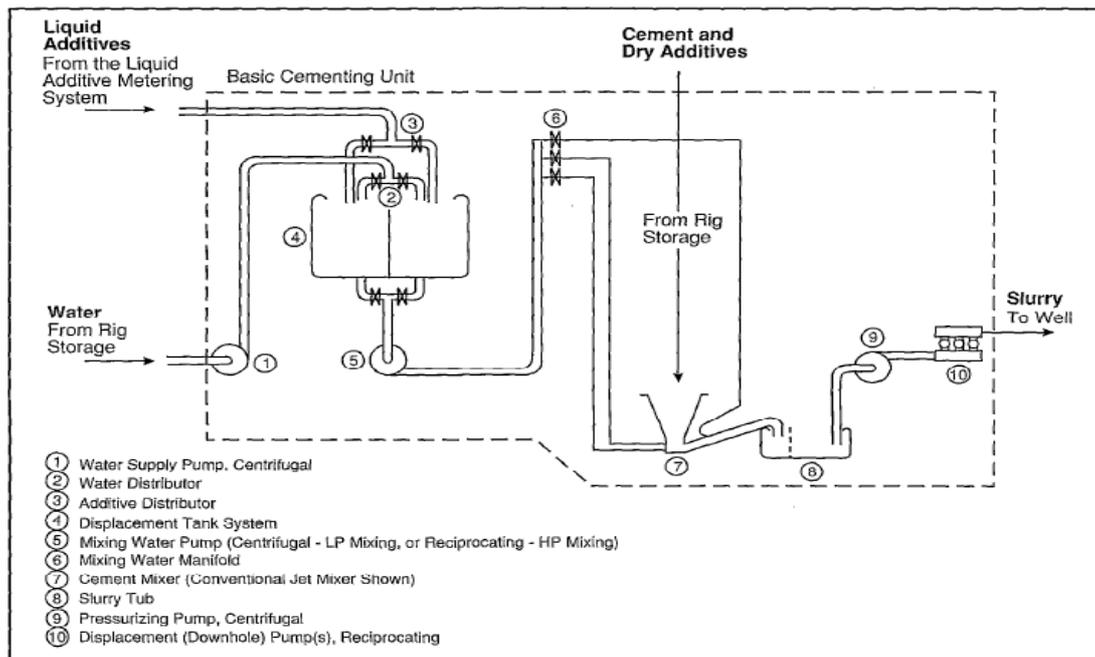


Figura 6. Configuração típica do sistema de cimentação (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986).

Após passar pela bomba de cimentação a pasta passará pela cabeça de cimentação, cuja localização depende do tipo de cimentação, em terra ou offshore. É nela que ficam alojados o plug de topo e o de fundo, possuindo mecanismos que mostram se os plug saíram da cabeça de cimentação.

A Figura 7 mostra os centralizadores, que são responsáveis por garantir a centralização do revestimento. Uma má centralização pode causar inúmeros problemas, desde a canalização até a má interpretação da qualidade da cimentação.

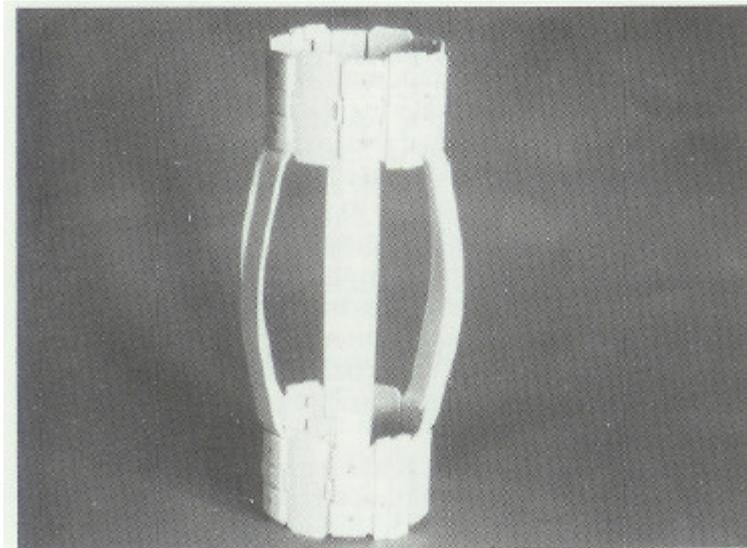


Figura 7. Centralizador (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986).

Outro equipamento instalado no revestimento é o collar (Figura 8), geralmente posicionado um tubo acima da sapata, e impede o retorno da pasta garantindo o assentamento da pasta no anular.

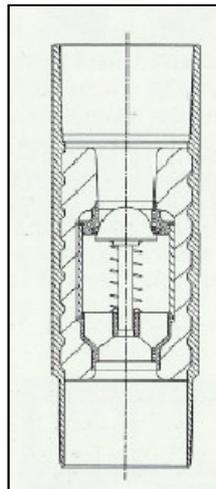


Figura 8. Collar (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986).

A sapata é um equipamento posicionado na base do revestimento e serve de guia para a descida do revestimento, evitando possíveis danos no revestimento causados por batente. A sapata pode ter um sistema parecido com o do collar impedindo a reentrada do cimento na coluna após a cimentação. A Figura 9 mostra a sapata simples.

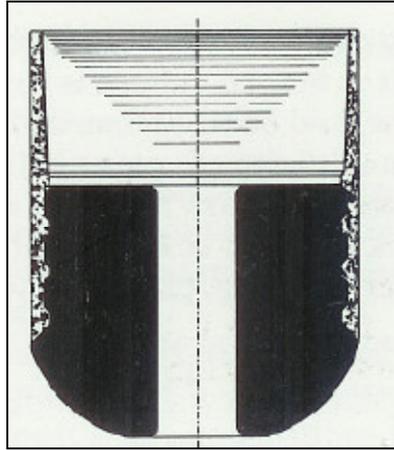


Figura 9. Sapata (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986).

A Figura 10 mostra o plug, que completa a operação de cimentação. Os plugs são utilizados para promover a separação de fluidos durante a cimentação, evitando contaminação. Em algumas situações é feita a cimentação em dois estágios e para isso é utilizado o collar de estágio (Figura 11). E desta forma, haverá duas zonas cimentadas de maneira distinta.

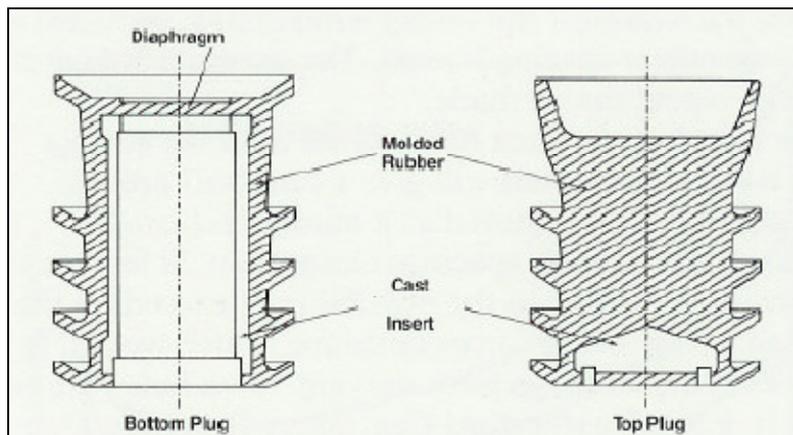


Figura 10. Plug (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986).

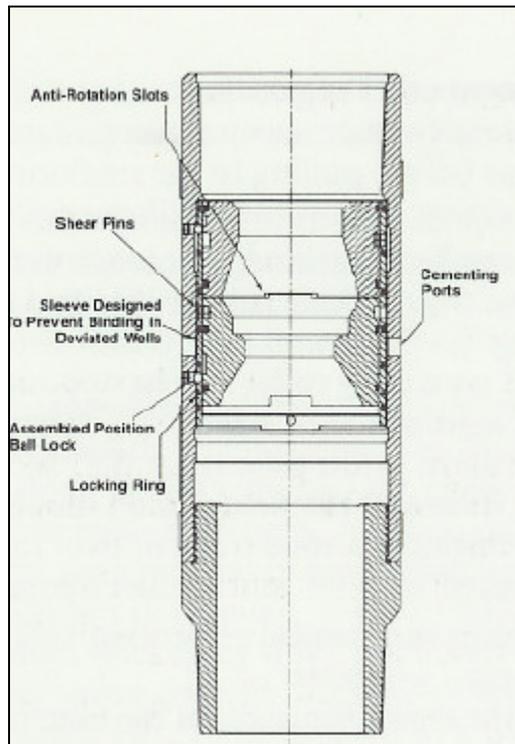


Figura 11. Collar de Estágio (Fonte: Cementing Program, Weatherford, 1986).

2.9. Avaliação da Cimentação

A avaliação da cimentação é de fundamental importância para se ter certeza da existência de um efetivo isolamento. A verificação da qualidade dos trabalhos de cimentação em poços de petróleo se baseia principalmente na interpretação de perfis acústicos, porém temos outros testes como o hidráulico e o perfil de temperatura que são pouco usados. Nas últimas décadas o perfil CBL/VDL tem sido o mais utilizado, mais recentemente tem-se a utilização de perfis ultrassônicos que permitem uma melhor avaliação, principalmente atuando nas limitações do perfil CBL/VDL. Porém, o método também possui suas limitações, principalmente devido à presença de gás, e por isso ambos os métodos são utilizados de forma combinada e descidos no poço em uma única corrida.

A ferramenta de perfilagem CBL/VDL é composta basicamente por um transmissor e dois receptores, também são necessários centralizadores para garantir o perfeito funcionamento do perfil. O transmissor recebe energia elétrica e a converte em energia mecânica, emitindo repetidamente pulsos acústicos.

O pulso sonoro emitido produz uma vibração que se propaga pelo revestimento, fluido e formação até chegar aos receptores, onde a energia mecânica é convertida em energia elétrica e os sinais enviados à superfície. O princípio de funcionamento do CBL

se baseia na medida da atenuação acústica sofrida pelo pulso que se propaga pelo revestimento. A presença de cimento no anular aderido ao revestimento provoca uma forte redução na amplitude do sinal registrado. Dois parâmetros são medidos: a amplitude, que é utilizada para quantificar os resultados da cimentação e o tempo de transito, utilizado como indicador de qualidade do perfil.

O perfil CBL/VDL é o registro de três medidas simultâneas, que são o tempo de transito, o sinal de amplitude do revestimento e o trem de ondas. O TT é utilizado para assegurar a qualidade e a acuracidade do sinal de amplitude. O sinal de amplitude do revestimento é usado para calcular a percentagem de cimento no anular. O registro completo do trem de ondas na forma de assinatura de onda ou densidade variável permite uma avaliação da aderência entre cimento e formação, controle de qualidade e outros fatores que afetam as medidas anteriores.

Através desses dados podemos perceber a presença do cimento no anular e a aderência do cimento com o revestimento e com a formação, sendo o único perfil que permite medir a aderência com a formação.

O perfil ultrassônico teve sua utilização iniciado nos anos 80 com a ferramenta CET (Cement Evaluation Tool), nos anos 90 uma segunda geração entrou no mercado substituindo os modelos anteriores, pois permitiam entre outros uma completa cobertura do revestimento, capacidade de operar em lamas pesadas e imagens coloridas. O método foi desenvolvido para combater as limitações do sônico, entre elas a maior dificuldade era a resolução azimutal que dificultava a percepção de canalização e cimento ruim e efeito do microanular.

O princípio básico de funcionamento é a medida do coeficiente do sinal ultrassônico de reflexão criado pelos materiais em contato com as superfícies internas e externas do revestimento. O processamento dos sinais refletidos permite inferir a impedância acústica do material do anular em contato com o revestimento, bem como medir o diâmetro interno e a espessura do revestimento.

3. ROCHAS SALINAS

Neste capítulo será apresentada uma introdução sobre as rochas salinas. Aspectos relacionados às propriedades físicas e químicas, sedimentação, tectônica e fenômenos térmicos serão abordados.

O conhecimento das propriedades das rochas salinas se mostra importante na etapa da cimentação de poços. Mais especificamente na etapa do desenvolvimento da pasta de cimento para uma dada zona perfurada.

Tal como o nome indica, as rochas salinas são formadas por precipitação química direta, a partir de salmouras concentradas. Podendo formar os Calcários, Dolomitos, Anidritas, Halitas (NaCl), Silvitas (KCl), entre outros.

3.1. Introdução

As rochas salinas são também conhecidas como evaporitos. Consistem em minerais e rochas que se depositaram pela evaporação da água. Isto é, em um primeiro momento, foram suspensos na água e em um segundo momento, após a evaporação da água, foram depositados. Para que ocorra precipitação desses minerais e rochas, que vão compor a rocha evaporítica, é necessário um ambiente de sedimentação com pouca energia, ou muito pouca energia, como por exemplo, ambientes lacustres.

O resfriamento do planeta fez com que ocorressem precipitações que formaram os mares e lagos, cujas evaporações periódicas controlaram a subsequente formação e transformação dos evaporitos.

O principal ambiente de formação corresponde ao de lagunas, em climas tropicais, com fortes e contínuas evaporações acompanhadas de afluxo sistemático ou intermitente de água salgada do mar e com pouco ou nenhum aporte de sedimentos clásticos.

A precipitação do sal acontece quando o soluto atinge o ponto de saturação salina daquele componente. Desta maneira, a deposição de camadas salinas ocorre em uma seqüência ou sucessão de salinização progressiva da bacia de deposição, dos sais menos solúveis para os mais solúveis; por exemplo, gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4) nas camadas inferiores, halita ("sal de cozinha" – NaCl), silvita (KCl), carnalita ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) nas camadas superiores.

Os evaporitos são encontrados em várias bacias de hidrocarbonetos ao redor do mundo, como mostra a Figura 12. Existem depósitos significativos nas águas profundas

do Golfo do México e em regiões “offshore” do oeste da África e Brasil, no Sul do Mar do Norte, Egito e Oriente Médio.



Figura 12. Depósitos Globais de Sais (Farmer *et al*, 1996).

3.2. Tectônica

A tectônica do sal refere-se aos mecanismos responsáveis pela deformação da camada-mãe de sal e à formação de estruturas diapíricas em escala regional. O entendimento da tectônica das camadas salinas é importante para o desenvolvimento da engenharia de petróleo em zonas salinas.

O histórico de estudos da tectônica do sal se divide na era dos trabalhos pioneiros, era do modelo de fluido para a halocinese e a era da tectônica extensional (Mohriak, 2008).

3.2.1. Mecânica do Movimento do Sal

O regime de esforços, responsável pela formação das estruturas halocinéticas em bacias intracratônicas e margens passivas, apresenta um esforço principal na direção vertical devido à força da gravidade e resultando em estruturas diversas, tais como, domos de sal, muralhas de sal, falhas de crescimento, etc. Os princípios básicos da deformação do sal seguem o comportamento dos fluidos (Barton, 1933; Nettleton, 1934; Weijermars *et al.*, 1993).

As forças de gravidade, assim como as diferenças de pressão, movem esses fluidos de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. As forças gravitacionais atuam nos corpos de sal de modo a criar uma pressão desigual sobre a área do sal. A

pressão resultante da sobrecarga sedimentar diferencial tende a mover o sal das regiões de alta para as de baixas pressões geostáticas, de maneira semelhante ao fluxo de fluidos causado por um diferencial de pressão hidrostática (Hubbert, 1951). Pelo princípio da fluabilidade, a sobrecarga sedimentar mais densa também leva o sal a subir para uma posição onde ocorra um equilíbrio isostático.

Demonstra-se que um evaporito pouco confinado na direção longitudinal ou transversal de uma bacia evaporítica pode fluir livremente para depressões profundas, transportando e deformando os sedimentos sobrepostos à camada de sal. A sobrecarga sedimentar também pode favorecer o fluxo do sal para fora da bacia, quando o sal estiver confinado. Desta forma, o sal tem uma tendência de fluir de áreas de grande sobrecarga para áreas de menor sobrecarga, normalmente ocorrendo o fluxo dos depocentros das bacias para as áreas de menor espessura sedimentar.

O sal tende a fluir para regiões onde o acúmulo de sedimentos é menor, particularmente para as bordas das bacias intracratônicas e para a região de águas profundas das bacias de margens continentais divergentes.

3.2.2. Formação de Diápiros de Sal

Denomina-se diápiro o corpo de massa rochosa, sólida ou parcialmente fundida, que ascende na litosfera ou na astenosfera por ser mais leve do que as encaixantes. Já diapirismo, é o processo de ascensão de diápiro, ou seja, de massa rochosa menos densa do que as encaixantes, resultando em intrusão das encaixantes acima que podem ser deformadas por este processo, muitas vezes em estruturas dômicas, juntamente com a própria massa intrusiva.

O fluxo lateral do sal está frequentemente acompanhando pela formação de almofadas e diápiros. Durante o processo pode ocorrer a subida da almofada de sal a um nível acima do regional, resultando em subafloramento e erosão (subterrânea ou marinha) das camadas logo acima da crista da almofada. Esse truncamento resulta em discordância angular, como é bastante freqüente se observar em linhas sísmicas no Mar do Norte (Jenyon, 1986). As causas da erosão das camadas de sal podem estar associadas ao rebaixamento do nível do mar, expondo as camadas à erosão subaérea, a correntes de contorno e à incisão por canais submarinos que ocorrem na plataforma, no talude e na região de águas profundas.

Além dos fatores que favorecem o crescimento de diápiros de sal, também são importantes os fatores mecânicos, que inibem o movimento ascendente do sal ou impedem o desenvolvimento de almofadas e diápiros. Como exemplo desses fatores:

- Resistência interna dos sedimentos;
- Suprimento de sal.

Intrusões de sal provocam deformações nas camadas encaixantes formando os chamados domos de sal que para a geologia do petróleo, reside no fato de as estruturas formadas pela intrusão favorecerem a acumulação de petróleo em subsuperfície.

As Figuras 13, 14, 15 e 16 ilustram a formação de um Diápiro de sal.

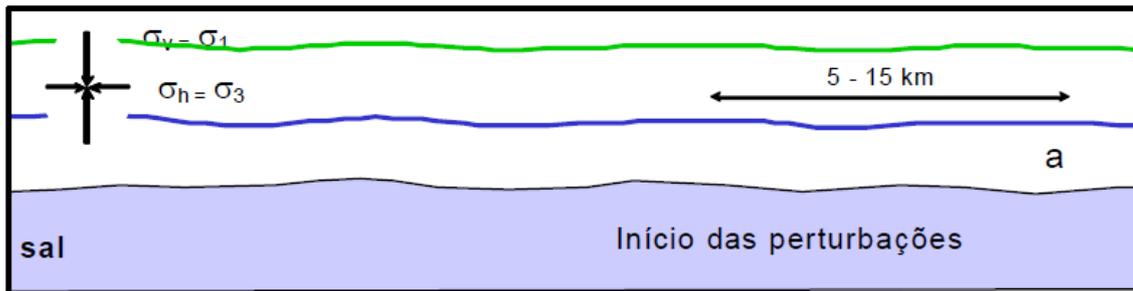


Figura 13. Estágio Inicial – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005).

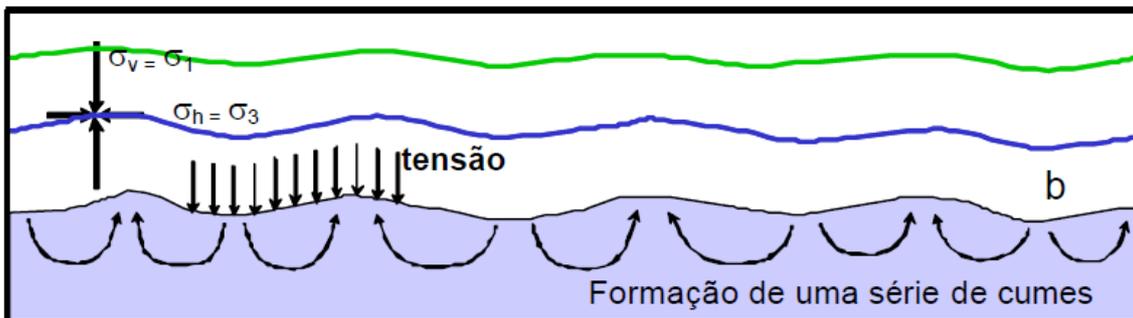


Figura 14. Estágio Intermediário – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005).

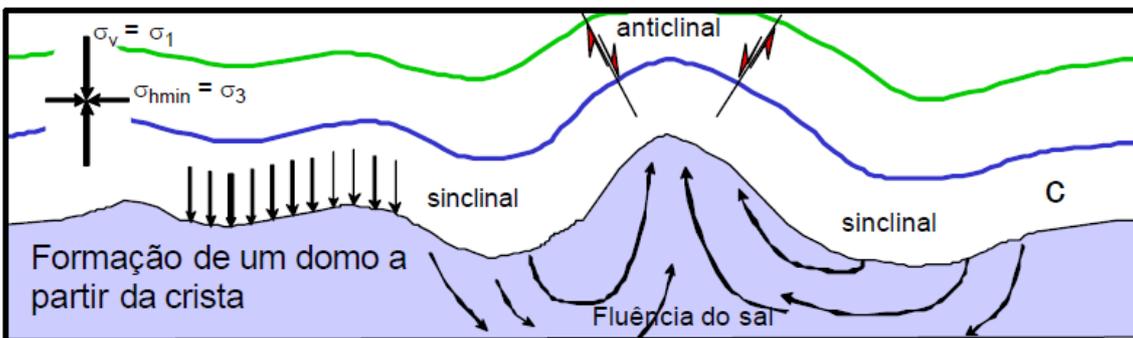


Figura 15. Estágio Intermediário – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005).

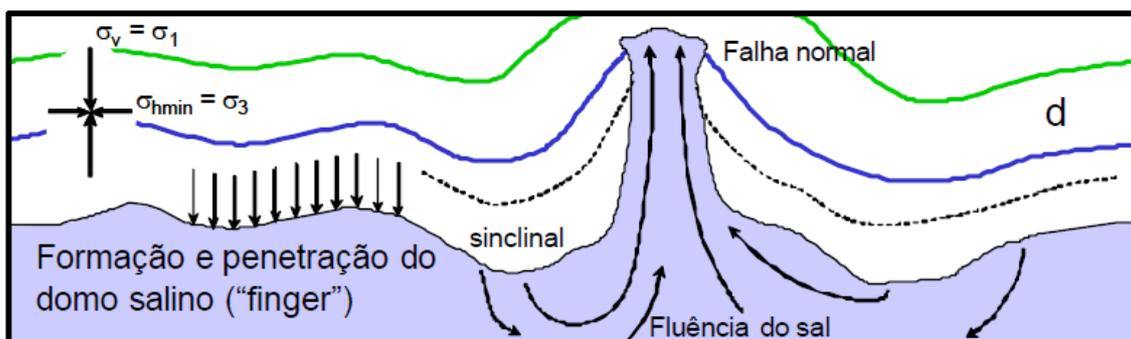


Figura 16. Estágio Final – Formação de um Diápiro de Sal (Fonte: Dusseault, M. B., 2005).

3.2.3. Controles Tectônicos para a Sedimentação de Evaporitos

O nível de base de uma bacia de evaporação é, supostamente, o nível médio dos mares (NMM) ou nível eustático, que depende de fatores climáticos e tectônicos (Hays & Pitman, 1973; Pitman, 1978). No caso de bacias situadas abaixo desse nível, como Mar Morto, por exemplo, o espaço necessário para acumulação de camadas de sal corresponde ao desnível topográfico.

Pitman (Pitman, 1978) discute o controle tectônico sobre as maiores variações do nível do mar, identificando duas situações fundamentais.

A primeira admite um cenário de colisão entre vários continentes, formando um megacontinente, com montanhas e plataformas rasas situadas entre massas continentais. Isto aconteceu em grande escala no final do Proterozóico, com formação do megacontinente Rodínia; no Devoniano e no Permiano, com formação do Pangea; e, em menor grau, também no Terciário, com a orogenia Alpina. A subducção dos oceanos rasos, consumidos entre os continentes em colisão, e a compressão de plataformas e taludes continentais formando montanhas, juntamente com a ampliação dos oceanos antigos e profundos, localizados nas bordas do megacontinente, resultou no aumento da profundidade média dos oceanos, o que levou ao recuo da água das plataformas continentais e à elevação dos continentes, às vezes, recobertos por desertos e geleiras.

A segunda situação baseia-se na hipótese de que a grande mudança no nível do mar ocorre quando o megacontinente está se “rifteando” e espalhando-se. Esses riftes, inicialmente continentais, podem evoluir para formar novos oceanos, portanto rasos, por

causa de sua litosfera ainda delgada e quente. Ao mesmo tempo, os oceanos velhos e profundos nas margens do megacontinente ficam subduzidos. Como resultado, os oceanos armazenam menos água e o nível do mar sobe. Segundo esse modelo, os mares evaporíticos hipersalinos se desenvolvem preferencialmente em dois contextos tectônicos: logo antes da colisão das placas e durante a fragmentação de um megacontinente.

O período mais apropriado para a formação dos evaporitos corresponde às épocas que antecedem, ou seguem imediatamente, as colisões continentais e a formação dos *redbeds* (camadas vermelhas em ambientes desérticos). Isso porque, nestas épocas, o megacontinente, ou ainda não se encontrava totalmente construído, e teria havido mares e oceanos residuais em fechamento, ou já teria iniciado sua fragmentação, com mares restritos entrando em riftes inter e intra continentais.

Os mares restritos, que se formaram durante o início da fragmentação dos megacontinentes, geralmente mantiveram a maioria dos seus evaporitos abaixo do nível do mar, tendo sido posteriormente recobertos por sedimentos espessos depositados na fase da deriva continental. O sal da margem continental brasileira é um exemplo, onde apenas uma pequena parte em Sergipe e outra no Espírito Santo encontra-se exposta.

O comportamento estrutural dos dois tipos de evaporitos que foram depositados, respectivamente, entre continentes em colisão e num megacontinente em separação são apropriadamente diferentes.

O primeiro tipo é geralmente associado a camadas planares, ocorrendo sob a forma de estratos tabulares de grande extensão e, às vezes, continuando em dobras e empurrões em direção ao orógeno ou cinturão de dobramento.

O segundo tipo aparece em bacias afetadas por falhas normais ativas durante a deposição do sal, formando estruturas do tipo *horsts* e grábens, e tornando a mineração muito mais difícil, como ocorre em Sergipe. Em ambos os casos, a sequência evaporítica representa importante obstáculo no caminho da migração de fluidos, criando um selo efetivo para o trapeamento do petróleo.

O primeiro tipo freqüentemente forma a base de grandes estruturas petrolíferas, como as que ocorrem no Oriente Médio (Mann *et al*, 2003). O segundo tipo é importante por controlar falhas extensionais que servirão de dutos para a migração do petróleo, gerado na sequência pré-sal, e acumulação de estruturas e trapas pós-sal (Schaller & Dauzacker, 1986; Figueiredo & Mohriak, 1986).

Na margem atlântica do Brasil, os evaporitos localmente recobrem jazidas petrolíferas em reservatórios pré-sal, como em Sergipe, no campo de Carmópolis. Mais comumente, entretanto, estão indiretamente ligados aos turbidíticos do Cretáceo Superior e do Terciário, como nas bacias de Espírito Santo, Campos e Santos.

Em resumo, as principais seqüências evaporíticas se formaram no final do Proterozóico, durante a fragmentação do megacontinente Rodínia; no Permiano, durante a colisão dos continentes que formaram a Pangea; no Jurássico-Cretáceo, durante a fragmentação do Pangea; e em vários pontos do globo terrestre, durante o Terciário, particularmente nas bacias Alpinas e na região do Oriente Médio.

Tanto a colisão como a ruptura e a separação de megacontinentes caracterizaram-se por dois fatores favoráveis a deposição de evaporitos: a presença de mares parcialmente isolados do oceano mundial, e um nível do mar relativamente baixo. Desta forma, durante a fase de maior dispersão de continentes, como no Ordoviciano e no Neocretáceo, o nível do mar estava relativamente alto, e a comunicação crescente entre os mares já não permitiu a formação de mares isolados e a deposição de evaporitos.

3.3. Sedimentação

Bacias evaporíticas são identificadas desde o proterozóico até o recente. No entanto, as maiores ocorrências de evaporitos na Terra são observadas apenas no passado geológico. Na história geológica, os evaporitos se formaram rapidamente, quase tanto quanto aos eventos vulcânicos, nas bacias sedimentares.

A deposição de sal é resultado da aridez climática e ausência ou diminuição do aporte de água, seja isolamento do oceano, redução da precipitação meteórica ou por ausência de drenagem (rios). Isto é, no ambiente de deposição há uma condição de evaporação maior que a entrada de água, geralmente associada a um ambiente desértico, árido e quente.

Os evaporitos foram depositados a partir de salmouras que mostram um enriquecimento de íons que normalmente estão presentes na água do mar, como o cloro e o sódio.

O ambiente de deposição dos evaporitos pode ser marinho ou não-marinho. A Tabela 6 mostra os minerais evaporitos marinhos.

Tabela 6. Minerais Evaporíticos Marinhos (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

Minerais Evaporíticos Marinhos		
	Halita	NaCl
Cloretos	Silvita	KCl
	Carnalita	CaMgCl ₃ .6H ₂ O
	Anidrita	CaSO ₄
	Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O
Sulfatos	Polialita	K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ .2 H ₂ O
	Kieserita	MgSO ₄ .H ₂ O
	Kainite	KMgClSO ₄ .3H ₂ O

A Figura 17 mostra o aspecto do mineral Halita.



Figura 17. Halita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

A Figura 18 mostra o aspecto do mineral Silvita.



Figura 18. Silvita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

A Figura 19 mostra o aspecto do mineral Carnalita.



Figura 19. Carnalita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

A Figura 20 mostra o aspecto do mineral Anidrita.



Figura 20. Anidrita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

A Figura 21 mostra o aspecto do mineral Gipsita.



Figura 21. Gipsita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

A Figura 22 mostra o aspecto do mineral Kieserita.

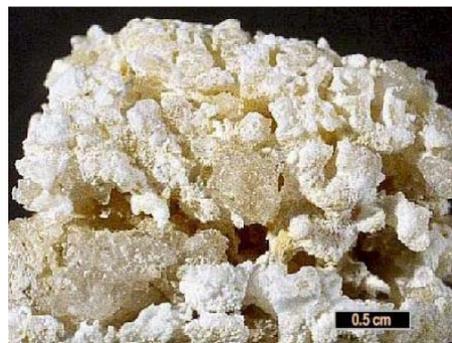


Figura 22. Kieserita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

A Figura 23 mostra o aspecto do mineral Kainite.



Figura 23. kainite (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

A Tabela 7 mostra os minerais evaporitos não-marinhos.

Tabela 7. Minerais Evaporíticos Não-Marinhos (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

Minerais Evaporíticos Não-Marinhos		
Cloretos	Halita	NaCl
Sulfatos	Anidrita	CaSO ₄
	Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O
	Thenardita	Na ₂ SO ₄
	Bloedita	Na ₂ SO ₄ .MgSO ₄ .4H ₂ O
	Epsomita	MgSO ₄ .7H ₂ O
	Mirabilite	NaSO ₄ .10H ₂ O
Carbonatos	Glauberita	CaNa ₂ (SO ₄) ₂
	Trona	Na ₃ (CO ₃)(HCO ₃).2H ₂ O
	Gaylussite	NaCO ₃ .CaCO ₃ .5H ₂ O

A Figura 24 mostra o aspecto do mineral Bloedita.



Figura 24. Bloedita (Fonte: www.jisanta.com/Geologia).

3.4. Introdução à Solubilidade dos Sais em Água

O fenômeno de dissolução resulta de uma interação entre o soluto e o solvente. Quando uma substância (soluto) se dissolve em outra (solvente), as partículas do soluto se dispersam no solvente.

Em um primeiro momento ocorre a separação das partículas do solvente, em seguida ocorre a separação das partículas do soluto e por último as partículas do soluto e do solvente se misturam.

Os sais são compostos formados por íons. As ligações que se estabelecem entre estes íons são ligações fortes, denominadas por ligações iônicas. Nestas ligações iônicas

as forças eletrostáticas são responsáveis pela atração entre os cátions e os ânions. Nos sais, os cátions e ânions se agrupam em redes iônicas, chamadas de redes cristalinas, em uma organização que pode resultar em diversas formas. Um dos exemplos mais comuns consiste a estrutura cúbica característica dos cristais de cloreto de sódio.

Quando uma substância iônica, como o cloreto de sódio, se dissolve em água, a malha tridimensional dos íons no cristal é desfeita, ou seja, os íons Na^+ e Cl^- ficam separados. Esta separação ocorre devido à interação com as moléculas da água, que consiste em um solvente polar. As atrações do tipo íon – dipolo, que se estabelecem entre os íons Na^+ e Cl^- com a água, são suficientemente fortes para separar os íons do cristal. Chama-se hidratação a este método de dissolução, que consiste num processo no qual um íon é rodeado por moléculas de água.

A solubilidade dos sais em água pode ser definida pela quantidade máxima de soluto que se consegue dissolver em água de modo a fazer 1 dm^3 de solução saturada, ou então, é a concentração de soluto numa solução saturada, a uma dada temperatura.

Uma solução saturada é uma solução, que a uma dada temperatura e pressão, contém dissolvida a quantidade máxima de soluto num determinado volume de solvente. Quando um sal é pouco solúvel num dado solvente a solução fica saturada com uma pequena quantidade de soluto.

A água pode ser considerada um bom solvente, dado que, devido à sua natureza, dissolve um elevado número de substâncias. Visto que a água é um solvente polar, a solubilidade de uma substância em água depende do tipo de unidades estruturais que essa substância possui. Geralmente, as substâncias covalentes polares e substâncias iônicas (sais e/ou hidróxidos) dissolvem-se em água. Por outro lado, as substâncias iônicas podem ser pouco, moderadamente ou muito solúveis em água. As substâncias covalentes apolares não se dissolvem ou dissolvem-se pouco em água.

Usualmente, um solvente polar dissolve um soluto polar (ou iônico) e um solvente apolar dissolve um soluto apolar.

Contudo, a solubilidade não depende apenas do tipo de unidades estruturais da substância que constitui o soluto, mas também depende de outros fatores, tais como:

- **Concentração** – Ao aumentar a concentração dos reagentes faz-se com que o equilíbrio evolua no sentido direto, produzindo uma maior quantidade de produtos. Na

existência de uma maior quantidade de íons, estes, por sua vez, combinam-se para formar um precipitado, até atingir o equilíbrio;

- **Temperatura** – quando a dissolução é um processo endotérmico, a solubilidade aumenta com o aumento de temperatura; quando a dissolução é um processo exotérmico, a solubilidade diminui com o aumento temperatura;
- **Pressão** – como a pressão é diretamente proporcional à temperatura pode dizer-se que quando a dissolução é um processo endotérmico, a solubilidade aumenta com o aumento de pressão; quando a dissolução é um processo exotérmico, a solubilidade diminui com o aumento pressão.

A agitação da solução aumenta a rapidez com que o sal se dissolve no solvente, não alterando a solubilidade, mantendo a temperatura e pressão constantes.

3.5. Propriedades Físicas e Químicas

As rochas salinas são diferentes das outras rochas. Os evaporitos são solúveis e, portanto, movimentam-se com facilidade. São instáveis na condição em que se encontram. Portanto, quando possível, se dissolvem em água e movimentam-se fisicamente.

O sal tem propriedades físicas diferentes das outras rochas por fluir em baixas temperaturas e pressões.

As propriedades físicas e químicas das substâncias refletem a estrutura dos átomos ou íons que as compõem.

A composição de sais no planeta é de 36.500 mg/l (3,65% em peso) onde, cerca de 97% corresponde ao cloreto de sódio. Portanto, o mineral formador de rocha predominante é o mineral Halita.

3.5.1. Propriedades Químicas

Diferentemente de outras rochas, as rochas salinas, em intervalos de tempo geologicamente pequenos, podem mudar de forma, transformando-se de camadas em domos estreitos e altos, ou mesmo dissolver-se completamente.

O entendimento do comportamento dos evaporitos passa pelas propriedades iônicas, ou seja, pela estrutura atômica dos elementos químicos que formam os diferentes sais. Os principais elementos que compõem o sal são o sódio (íon com carga +1) e o cloro (íon com carga -1). Estes íons se completam e, estando em um meio líquido onde possam se movimentar, acabam por se juntar temporariamente numa

ligação não muito estável. Outro íon muito importante na água do mar é o magnésio (ocorre como Mg^{++}) que geralmente forma evaporitos que contêm moléculas de água em sua composição química. Para melhor entender o comportamento dos evaporitos é preciso entender o comportamento dos íons em solução e de que modo a adição de outros íons irá afetar a solubilidade dos sais presentes.

No modelo atômico do cloreto de sódio, o átomo de sódio, com um elétron distante na camada mais externa, perde um elétron para o átomo de cloro, que apresenta um espaço na camada mais externa, passível de ser preenchido para completar o octeto estável na camada de elétrons. Ocorre uma atração elétrica entre esses íons, e eles vão se juntar para ficarem mais estáveis. Esse processo é chamado de reação iônica onde esses íons unidos formam um composto comum nos evaporitos, o mineral Halita.

O cloreto de sódio apresenta um retículo cristalino cúbico, no qual as faces do cristal se distribuem em ângulo reto entre si. Essa estrutura vai se refletir na formação dos cristais de halita, que se apresentam na natureza com forma cúbica. Cristais de halita são precipitados quando a concentração de salmoura excede a solubilidade do sal.

Quando se observa uma camada de Halita em uma seqüência, esta é formada por pequenos cristais cúbicos que obedecem à estrutura atômica do mineral. Os íons de sódio e de cloro são arranjados alternadamente nas quinas dos cubos.

3.5.1.1. Potencial Iônico

Nos elementos químicos, os raios iônicos divergem dos raios atômicos. Um íon positivo é formado pela remoção de parte dos elétrons na camada mais externa, portanto, ocorre uma diminuição do tamanho do íon. Assim, o cátion é muito menor do que o átomo de um mesmo elemento. Quanto mais elétrons são removidos, menor é o tamanho do íon.

Quando se forma um íon negativo, um ou mais elétrons são adicionados ao átomo. A nuvem de elétrons se expande com esse elétron extra, e ocorre uma diminuição da força de atração entre o núcleo e a nuvem de elétrons. Os maiores valores de raios atômicos de alguns elementos comuns em evaporitos ocorrem nos elementos da coluna 1 da tabela periódica.

A densidade da carga elétrica na superfície dos íons, denominada potencial iônico, é uma importante propriedade que vai caracterizar a força das ligações entre os compostos químicos. O potencial iônico é definido como a carga do íon dividida pela área da superfície (ou pelo raio iônico). Desta forma, quanto maior a carga, maior o

potencial iônico do elemento químico, e quanto maior o tamanho do íon, menor o potencial.

Pela definição de potencial iônico, verifica-se que quanto maior o tamanho do íon, menor o potencial. Ou seja, a carga elétrica fica distribuída numa área maior, portanto, fica mais difusa a força de atração.

Em relação à resistência ao deslocamento, quanto maior o potencial iônico, maior será a resistência.

Os evaporitos têm íons (K, Na, Cl) com potencial muito baixo, pois possuem uma carga elétrica pequena e grande raio iônico. Isso resulta em uma grande facilidade de dissolução do composto em água e também numa alta mobilidade dos íons no reticulado cristalino da substância sólida. Uma vez que os íons estão dispostos na relação 1:1 na estrutura, um deslocamento linear de uma fileira de íons vai contrapor outros íons iguais na mesma posição. Com o tempo, o sal pode fluir com grande facilidade, se comparado com o vidro, que tem a composição da areia (óxido de silício).

Os íons (Na^+ e Cl^-) têm um potencial iônico muito baixo, portanto, são fáceis de se moverem nos planos que constituem as faces do cubo do cristal. Essa grande facilidade de deslocamento entre camadas é que torna a halita (NaCl) um composto intermediário entre um líquido e um sólido. A força que mantém os íons juntos é pequena, e qualquer esforço pode deslocar os íons; depois estes se rearranjam para formar a estrutura, com cada íon de sódio se ligando a outro íon de cloro. Quando o esforço é grande e a pressão confinante é pequena, podem ser formadas falhas que vão romper essa estrutura.

Na realidade, todas as substâncias fluem com o tempo, dependendo das características reológicas, que são também associadas à estrutura química dos compostos. A Tabela 8 mostra o raio atômico dos elementos mais comuns.

Tabela 8. Raio Atômicos dos Elementos mais Comuns (Fonte: Mohriak *et al*, 2008).

Nome	Elemento	Raio Atômico
Hidrogênio	H	0,30
Lítio	Li	1,23
Sódio	Na	1,57
Potássio	K	2,03
Magnésio	Mg	1,36
Cálcio	Ca	1,74
Flúor	F	0,72
Alumínio	Al	1,25
Silício	Si	1,17
Nitrogênio	N	0,74
Fósforo	P	1,10
Oxigênio	O	0,74
Enxofre	S	1,04
Cloro	Cl	0,99
Argônio	Ar	1,91
Carbono	C	0,77
Zinco	Zn	1,25

3.5.1.2. Lei dos Íons Comuns

A deposição dos evaporitos num líquido obedece a diversas leis da química, formando diferentes seqüências de sais, devido a diferentes solubilidades dos compostos em água. Entre essas leis discute-se o efeito dos íons comuns para alterar a solubilidade dos evaporitos em solução aquosa.

O efeito do íon comum afeta as taxas de reação química, forçando um composto iônico a se precipitar da solução quando se adiciona um de seus íons na água. A adição do íon comum irá fazer com que a solubilidade do primeiro sal seja reduzida, de modo a precipitar mais daquele sólido. Quando isso ocorre, há uma nuvem de pequenos cristais se precipitando ao mesmo tempo, uma vez que há grande competição para deposição do soluto.

Pela lei dos íons comuns, uma sequência de evaporitos (Halita) com cristais bem grandes indica que havia apenas um composto importante com o íon cloreto. Por isso, depositam-se primeiro os cristais maiores, com bastante tempo para formar as faces e pouca competição com os cristais vizinhos. Numa situação em que se aumenta a quantidade de um outro soluto na solução, que tenha o mesmo ânion da halita (exemplo, silvita, cloreto de potássio), começam a se depositar cristais menores de halita.

Numa sequência de sais onde os cristais são pequenos, indica que houve mais competição para depositar os mais diversos sais. Quanto menores os cristais, tanto maior a quantidade de íons de outros solutos na solução:

- cristais grandes indicam baixa concentração de outros solutos (baixa competição para se precipitar);
- cristais pequenos indicam alta concentração dos outros íons (muita competição para precipitar).

3.5.1.3. Propriedades Iônicas dos Minerais Evaporíticos e sua Implicação para a Tectônica

A resistência à erosão e o comportamento reológico dos diferentes evaporitos estão relacionados com as propriedades iônicas dos elementos químicos.

Os íons mais comuns presentes nos evaporitos, como sódio, potássio e cloro, apresentam baixo potencial iônico, em função de sua valência e raio iônico, sendo facilmente removidos das rochas pelo intemperismo, e transportados em direção ao mar. Desta forma, os elementos como Na e K, acumulam-se no mar, ainda durante o Arqueano, a partir do intemperismo das rochas da litosfera expostas na superfície.

O baixo potencial dos íons que compõem os evaporitos também afeta fortemente a deformação destas rochas depois de soterradas. As rochas evaporíticas se deformam por fluxo, porque a atração entre seus íons é relativamente baixa. Nas rochas evaporíticas, sem ocorrer significativa elevação de temperatura, as mesmas estruturas podem ser vistas em gnaisses e outras rochas metamórficas formadas a altas temperaturas.

Em situações de pequenos esforços tectônicos, pode-se observar na natureza grandes diápiros de sal, acompanhados por suaves dobramentos em calcários, enquanto que em arenitos e dolomitos as dobras são mais raças ou ausentes. As dobras mais notáveis são vistas sempre nos calcários, enquanto que rochas menos resistentes, como folhelhos e evaporitos, tendem a fluir.

A valência do Ca e do Mg é 2^+ que consiste no dobro do Na e K. Como resultado, o fenômeno de fluxo em estado sólido em calcários e dolomitos torna-se muito mais difícil de ser observado na natureza, necessitando de um esforço muito maior que o necessário para deformar os minerais halita e silvita.

Os dolomitos tendem a se quebrar, fraturar, formando reservatórios para a acumulação de petróleo, enquanto calcários finos, como calcilutitos e análogos mais grosseiros, não apresentam a mesma intensidade de fraturamento, sendo mais facilmente deformados em dobras.

3.5.1.4. Sequência de Deposição de Minerais Evaporíticos

A intensa evaporação de água do mar, em bacias de circulação restrita, resulta na concentração de sais formando as salmouras, que passam a precipitar os sais nelas dissolvidos, gerando, assim, os depósitos evaporíticos que são encontrados nas bacias sedimentares, formados por diversos minerais.

Para que isso ocorra, é necessário que a taxa de evaporação seja maior que a taxa de precipitação pluviométrica mais o influxo de água doce e salgada, ou seja, a saída da água do sistema deve suplantar a entrada de água da chuva, dos mares e dos rios. A existência de um ambiente desértico ou essencialmente árido é uma condição necessária para a formação de evaporitos, mas, além disso, é importante ocorrer o isolamento da bacia, de modo a permitir uma progressiva concentração e deposição seqüencial dos evaporitos. A Tabela 9 mostra a composição química dos principais minerais evaporíticos.

Tabela 9. Composição Química dos Principais Minerais Evaporíticos (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008).

Mineral	Composição
Calcita	CaCO ₃
Magnesita	MgCO ₃
Dolomita	Ca(Fe,Mg)(CO ₃) ₂
Gipsita	Na ₂ H(CO ₃) ₂ .2H ₂ O
Anidrita	CaSO ₄
Halita	NaCl
Silvita	KCl
Carnalita	KMgCl ₃ .6H ₂ O
Taquidrita	CaMg ₂ .Cl ₆ 12H ₂ O

O termo “salmoura” é utilizado para designar soluções aquosas com grande concentração de íons de sal (maior que 100g/l). O termo “evaporito” é utilizado para descrever os precipitados químicos a partir dessas soluções, numa sequência que abrange carbonatos, sulfatos e cloretos.

Os principais minerais evaporíticos são formados por íons presentes na água do mar. Assim, cada vez que a concentração destes íons ultrapassa sua solubilidade na água, precipitam compostos químicos diversos (Valyashko, 1956; Strakhov, 1969).

A geração de minerais evaporíticos pode ocorrer em ambientes marinhos e não-marinhos, no interior dos continentes. Esses ambientes podem estar localizados em regiões marinhas rasas subtropicais, regiões desérticas, regiões polares ou em aquíferos subterrâneos.

Numa bacia evaporítica, ocorrem sucessões litológicas indicativas de variação de salinidade da salmoura com o tempo geológico. Essas fases de alta e baixa salinidades se alternam em função da aridez climática e do aporte de água na bacia, dividindo a sequência em intervalos ou ciclos evaporíticos, correlacionáveis em grande parte da área deposicional.

Os ciclos de primeira ordem são definidos pelo aumento da salinidade ambiental, desde o seu mais baixo teor até o mais alto, voltando novamente para o mais baixo, em função da variação do nível do mar ou do nível da salmoura na bacia evaporítica (Jenyon, 1986; Carvalho, 1987; Warren, 1989). Cada ciclo é marcado, na

base da sequência estratigráfica, por camadas contínuas de folhelhos pretos, altamente orgânicos, extremamente favoráveis à geração de hidrocarbonetos. O seu conteúdo elevado em H_2S torna-os preferenciais para depósitos de sulfetos metálicos. O topo da sequência de um ciclo evaporítico pode ser marcado pela deposição de sais mais solúveis, como os sais de magnésio, e os de potássio, o que os torna preferenciais para a exploração de silvinita.

A precipitação dos evaporitos segue uma sequência bem definida, de acordo com as leis químicas, com diferentes minerais se formando em função das diferentes solubilidades (Richter-Bernburg, 1972; Hardie, 1984; Sonnenfeld, 1992). A ordem de deposição dos sais depende de dois fatores: a solubilidade e a quantidade de cada composto disponível na água do mar. A Tabela 10 mostra os componentes das rochas salinas.

Tabela 10. Componentes das Rochas Salinas (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008).

Zona	Mineral Primário Formador da Rocha	Minerais Secundários e outros
		Minerais Associados (diagenéticos e epigeéticos)
		Kieserita
	Carnalita	Langbeinita
Carnalita	Sulfato de Magnésio	Kainita
	Kainita	Polihalita
		Anidrita
	Silvita	Kainita
	Hexahidrita	Langbeinita
Silvita	Epsomita	Kieserita
	Polihalita	Polihalita
	Halita	
	Epsomita	Kieserita
	Hexahidrita	Polihalita
Sulfato de Magnésio	Polihalita	Bloedita
	Halita	
	Halita	Anidrita
Halita	Gipsita	Polihalita
Gipsita - Anidrita	Gipsita	Anidrita

Carbonatos são minerais que não são exatamente evaporíticos, mas que frequentemente acompanham a deposição dos evaporitos, como calcita, aragonita e dolomita.

Sulfato de cálcio é geralmente depositado como gipsita e, mais tarde, transformado em anidrita, na medida em que se perde água cristalina. A gipsita é geralmente o primeiro mineral realmente evaporítico a precipitar em seqüências evaporíticas, e o último a permanecer depois que a bacia evaporítica é afetada por incursões marinhas e dissolução de sais mais solúveis. Quando a gipsita se transforma em anidrita, com o aumento de pressão e temperatura, ocorre uma perda de cerca de 60% do volume; a rocha é compactada. Quando a anidrita se transforma em gipsita aumenta o volume em 60%.

Halita é o mineral evaporítico mais abundante, tanto em depósitos salinos como dissolvido na água do mar. Ela começa a se depositar quando sua concentração na salmoura chega a 27%. Por causa de sua estrutura cristalina iônica cúbica, a pequena valência de seus íons e o grande raio iônico, a halita se deforma com facilidade, permitindo a halocinese e a tectônica do sal.

A carnalita precipita-se apenas de salmouras altamente concentradas, depositada singeneticamente. Com a dissolução do cloreto de magnésio ($MgCl_2$) pode transformar-se em silvita (KCl).

Taquidrita ($CaMg_2Cl_6 \cdot 12H_2O$) é o mineral cujo nome reflete sua rápida hidratação; um cristal que posto na mesa, em pouco tempo se transforma em uma poça de água, absorvendo a água do ar. Possui uma rápida dissolução.

Desses sais, os mais comuns numa bacia evaporítica (excluindo-se os carbonatos, que podem ou não ser precipitados químicos, como calcita, dolomita e magnesita) são os sulfatos de cálcio (gipsita e anidrita), que são os primeiros a serem depositados. O próximo, em ordem de abundância na natureza, é a halita. Os sais de potássio e magnésio são mais escassos, e os últimos a se depositarem, destacando-se a silvita e a carnalita como os mais importantes. Os boratos são minerais menos comuns e, geralmente, são de origem não-marinha.

3.5.2. Propriedades Físicas

Os evaporitos são rochas com propriedades petrofísicas incomuns quando comparadas as outras litologias na crosta terrestre. A halita possui grande solubilidade em água, dureza relativamente baixa (2,5 na escala Mohs), densidade baixa a moderada, baixa viscosidade, alta condutividade térmica, alta velocidade de penetração de ondas sísmicas e é não-magnética. A temperatura de fusão da halita é relativamente baixa. A Tabela 11 mostra as propriedades físicas da halita.

Tabela 11. Propriedades Físicas da Halita (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008).

Propriedade	Valor Típico	Comentário
Densidade	2,2 g/cm ³	Varia com impurezas
Viscosidade	10 ¹⁴ Pa.s	
Condutividade Térmica	4,5 W/m/°C	Duas a quatro vezes maior do que as outras rochas
Ponto de Fusão	804 °C	Pode ser fundida por intrusivas ígneas
Velocidade Sísmica	4.500 m/s	
Suscetibilidade Magnética	~ 0 cgs	25-100 cgs para outras rochas sedimentares

3.5.2.1. Densidade

Consiste em uma importante propriedade física por ser muito utilizada nos perfis elétricos para discriminar diferentes tipos de sais, uma vez que varia muito pouco para uma mesma litologia evaporítica. A composição química da rocha salina controla a densidade.

O sal apresenta densidade maior que rochas clásticas e carbonáticas no momento da deposição. Porém, quando essas rochas são soterradas a profundidade maior que 1000 metros, a densidade fica menor quando comparadas a outras rochas sedimentares. A densidade do sal não muda com a profundidade, pois não há compactação com a diagênese. Porém, outros sedimentos sofrem compactação resultando em aumento significativo da densidade.

Essa propriedade é importante para a distinção do comportamento reológico entre diápiro de sal e diápiro de folhelho. Enquanto o diápiro de folhelho, quando soterrado a grandes profundidades, perde água e fica denso, tornando-se praticamente imóvel, o sal, mesmo a grandes profundidades, apresenta baixa densidade, e reage mais facilmente aos esforços tectônicos.

3.5.2.2. Viscosidade

A viscosidade de um material fluido é a propriedade que mede a resistência interna ao fluxo. O sal, com uma viscosidade que atinge 1.016 Pa.s, apresenta um comportamento plástico que o torna diferente de outras rochas (Weijermars *et al.*, 1993). A Tabela 12 mostra a viscosidade média de alguns materiais fluidos.

Tabela 12. Viscosidade Média de Alguns Materiais Fluidos (Fonte: Mohriak, *et al.*, 2008).

Material	Viscosidade (Pa.s)
Água	10^{-3}
Gelo	10^{12}
Vidro	10^{14}
Halita	10^{17}
Astenosfera	10^{22}

Essa propriedade resulta em uma rocha de grande mobilidade, sendo aproximada a um fluido quando submetida a esforços geológicos.

As rochas, em geral, apresentam taxas de deformação pequenas. Porém, a halita, por exemplo, apresenta uma rápida taxa de deformação.

Além disso, a partir de dados experimentais (Talbot & Jarvis, 1984) observa-se que o sal seco possui viscosidade maior que o sal molhado. Isto significa que a presença da água altera a viscosidade do sal.

3.5.2.3. Resistência ao Esforço Compressional e Extensional

O sal é um material bastante fluido e, frequentemente, observa-se a análise da deformação desta rocha através da mecânica dos fluidos. O sal apresenta um comportamento plástico ou dúctil quando a tensão excede 100 bars, mas, em um nível menor do que essa tensão, o sal apresenta comportamento rígido, sendo inclusive, rompido por falhas extensionais e compressionais.

O comportamento elástico ou plástico do sal depende também da taxa de deformação. Sob a pressão de 1 atmosfera e temperatura ambiente, o sal apresenta um comportamento tão rígido quanto o concreto para esforços em curto tempo. Entretanto, durante o tempo geológico apresenta um comportamento dúctil.

As rochas quando submetidas a esforços compressivos e extensionais apresentam diferentes respostas, deformando-se elasticamente até determinados valores e depois rompendo-se quando o valor de resistência é excedido.

Os evaporitos quando submetidos a esforços extensionais e compressivos em laboratórios, apresentam reologia que obedecem a leis exponenciais, de modo semelhante ao que se observa em outras rochas comuns na crosta terrestre, com uma resistência maior à compressão do que à extensão. A Tabela 13 mostra valores típicos para resistência das rochas aos esforços compressivos e extensivos.

Tabela 13. Resistência à Compressão e Tensão de Rochas Salinas (Fonte: Mohriak *et al*, 2008).

Rocha	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
Calcário	200 – 300	15 – 20
Dolomito	800	20
Arenito	500 – 600	20 – 30
Basalto	3100 – 3200	200

3.5.2.4. Condutividade Térmica

A condutividade térmica da Halita é aproximadamente três vezes maior do que a das outras rochas sedimentares.

3.5.2.5. Velocidade Sísmica

A velocidade sísmica na Halita é alta e, aliada à sua baixa densidade, é um importante fator de discriminação em relação a outras rochas evaporíticas e sedimentares.

3.5.2.6. Susceptibilidade Magnética

O sal apresenta uma susceptibilidade magnética essencialmente nula, devido a ausência de minerais magnéticos nos evaporitos.

3.5.2.7. Ponto de Fusão

O ponto de fusão da Halita é relativamente baixo, em torno de 800 °C, e o da Anidrita é ainda menor. Desse modo, intrusões ígneas e vulcânicas resultam na fusão da camada de evaporitos, aumentando sua fluidez e mobilidade (Gussow, 1968). A diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura também facilita a mobilização do sal e a formação de falhas que vão descolar na camada de evaporito.

3.6. Fenômenos Térmicos Associados

Os evaporitos são geralmente mais condutivos que a maioria das rochas sedimentares. Desta forma, são capazes de alterar localmente o fluxo natural de calor.

A energia térmica que flui do interior da terra até a superfície, em uma bacia sedimentar, é somatória do calor advindo do manto (astenosfera), da produção radiogênica da crosta e dos sedimentos. A energia permeia o meio poroso através de três distintos modos de transferência de calor: a condução, a convecção e a radiação.

A transmissão de calor por condução é o principal meio de transferência de energia nas bacias sedimentares. O calor passa de partícula para partícula do meio físico mais quente para o mais frio, do subsolo para a superfície. A temperatura mais elevada implica em uma energia cinética mais elevada, ou seja, em um movimento mais intenso e desordenado das moléculas.

A condução térmica de um material é condicionada pela condutividade térmica das substâncias que o compõe. Essa propriedade regula a quantidade de calor possível de ser transmitida por unidade de tempo através de uma superfície sob determinado diferencial de temperatura.

A condutividade térmica de um material é sua habilidade em conduzir calor, ou seja, um material de alta condutividade apresenta-se como um bom condutor térmico, e baixa condutividade caracteriza os materiais designados como isolantes.

O sal, por não apresentar perdas por porosidade (ausência de fluidos isolantes), está entre as rochas mais condutivas das bacias sedimentares.

O fluxo de calor por convecção também pode desempenhar um papel importante na transmissão de calor nas bacias sedimentares. Por este processo, a energia se desloca acompanhando o próprio material aquecido.

A propagação de calor por radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas, sem a necessidade de contato físico entre a fonte e o destino da energia.

Os evaporitos ocorrem na margem leste brasileira, em uma complexa suíte de rochas, grande parte composta por halita, anidrita, carnalita e silvinita (Szatmari *et al*, 1974; Szatmari, 1980; 1982).

Em geral, os evaporitos transmitem mais rapidamente o calor e, quando tomam formas estruturadas, podem perturbar o fluxo térmico natural (Gussow, 1968).

A carnalita consiste em uma exceção entre os evaporitos com uma condutividade térmica de 3 a 4 vezes menor. A condutividade térmica da halita varia com a temperatura e a pressão, bem como com a mistura com outros sais ou com algum conteúdo de argila (Schon, 1996). Em geral, a condutividade térmica dos evaporitos nas condições sedimentares diminui com temperatura, bem como com impurezas naturais intercaladas.

Os evaporitos condutivos com geometrias estruturadas podem criar caminhos mais curtos para a fuga de calor do interior da crosta e diminuir sensivelmente os gradientes geotérmicos medidos em sua proximidade.

Os evaporitos da margem continental leste brasileira foram depositados em um momento termicamente significativo para a evolução destas bacias: próximo à fase final de rifteamento (Araújo *et al*, 2003; Gonzaga, 2005), que é o momento geotérmico mais intenso na evolução da bacia.

A maior mobilidade da Halita entre os evaporitos contribui para a fascinante deformação e compartimentação estrutural da sequência estratigráfica pós sal, em algumas bacias marginais brasileiras, notadamente na região de águas profundas (Mohriak *et al*, 1995). Além disso, a alta susceptibilidade reológica da Halita às variações de temperatura determina alterações de sua viscosidade (Lerche & O'Brien, 1987) e contribui para ampliar a mobilidade característica do sal nas condições naturais. Sob pressão atmosférica, o ponto de fusão da Halita ocorre apenas a 800 °C e, como sua viscosidade tende a diminuir sob o aumento da temperatura do meio, a Halita demonstra um comportamento plástico já a 350 °C e uma mobilidade relativa a 200 °C, ainda sob pressão atmosférica (Gussow, 1968; Fox & McDonald, 1978).

3.7. Fluência

As rochas salinas no litoral brasileiro são Halita, Carnalita e Taquidrita. Nesta ordem, as rochas se encontram com taxas crescentes de fluência.

3.8. Desafios da Cimentação de Poços em Zonas de Rochas Evaporíticas

O escoamento da pasta de cimento no anular de um poço perfurado em uma zona de rocha salina é criterioso porque a água contida na pasta de cimento poderá dissolver sal da formação. Uma vez que o sal pode provocar mudanças nas propriedades da pasta no estado fresco e endurecido, há a necessidade de se estudar o efeito do sal em pastas de cimento para poços de petróleo em zonas salinas.

4. MATERIAIS, PROGRAMA EXPERIMENTAL E MÉTODOS DE ENSAIO

Neste capítulo será apresentado o programa experimental do presente trabalho, bem como os materiais e métodos de ensaio utilizados.

Todos os equipamentos e materiais citados neste capítulo fazem parte do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ/PEC.

4.1. Materiais

Os materiais utilizados na confecção das pastas de cimento estudadas foram o cimento Classe G, água deionizada, aditivo anti-espumante, cloreto de sódio ou cloreto de potássio.

A Figura 25 mostra o deionizador de água.



Figura 25. Deionizador de Água.

O cimento Classe G apresenta as propriedades químicas e físicas mostradas nas Tabelas 15 e 16, respectivamente, e no Gráfico 1. Essas propriedades foram determinadas através de ensaios de granulometria, massa específica e demanda d'água que juntos formam a caracterização do cimento em questão.

A Tabela 15 mostra a composição química do cimento Portland utilizado nos ensaios deste trabalho.

Tabela 15. Composição Química (% de massa) do Cimento Classe G.

Composto	% em massa
SiO₂	18
Al₂O₃	4,1
K₂O	0,5
Fe₂O₃	5,4
CaO	67,4
SO₃	3,8

A Tabela 16 mostra as propriedades físicas do cimento Classe G.

Tabela 16. Propriedades Físicas do Cimento Classe G.

Propriedade Física	Cimento Portland
Massa Específica (kg/m³)	3,23
D₉₀* (µm)	44,7
D₅₀** (µm)	17
Compacidade	0,55

*Tamanho abaixo do qual se encontra 90% da massa do material.

**Tamanho abaixo do qual se encontra 50% da massa do material.

O Gráfico 1 mostra a distribuição granulométrica do cimento Classe G, cimento mais utilizado em perfuração de poços. Sua utilização deve-se a maior resistência que é capaz de desenvolver.

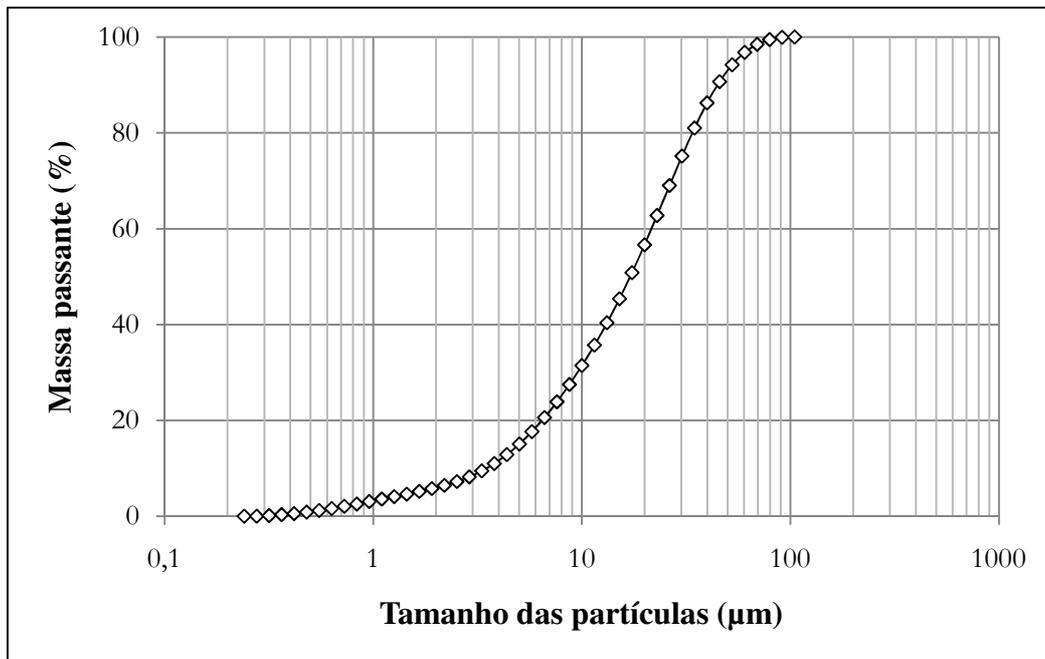


Gráfico 1. Distribuição Granulométrica do Cimento Portland.

A Figura 26 mostra o aspecto do cimento Classe G.



Figura 26. Aspecto do Cimento Portland Classe G.

Durante o preparo da pasta pode haver a incorporação de ar e por isso foi utilizado o aditivo anti-espumante D AIR 3000 L, utilizado para diminuir a tensão superficial da pasta. Com isso a película de líquido não consegue conter o ar encapsulado.

Os sais adicionados às pastas salinas testadas foram os cloretos de sódio (Halita) e de potássio (Silvita). A Halita é o tipo de rocha salina mais comum no litoral

brasileiro. E o íon de potássio aparece em diversas rochas salinas, incluindo a Silvita. O aspecto destes sais é mostrado nas Figuras 27 e 28.



Figura 27. Aspecto do Cloreto de Sódio.

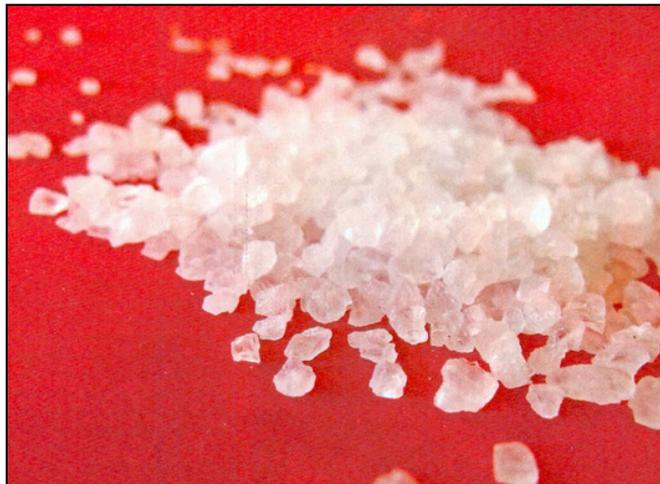


Figura 28. Aspecto do Cloreto de Potássio.

4.2. Programa Experimental

O Programa experimental foi elaborado visando avaliar a influência do sal em pastas de cimento. Para tanto, foram produzidas 10 pastas de cimento. A Tabela 14 apresenta as dosagens das pastas avaliadas.

Tabela 14. Dosagem das Pastas Estudadas

Pasta	Cimento (g)	D-AIR 3000L (g)	Água (g)	Sal (g)
Referência	788,34	1,95	347,6	-
5% NaCl	771,81	1,91	346,8	17,3
10% NaCl	755,35	1,85	346,0	34,4
12,5% NaCl	747,16	1,84	345,6	43,2
15% NaCl	738,97	1,82	345,2	51,8
17,5% NaCl	730,815	1,81	344,8	60,3
2,5% KCl	780,39	1,9	346,9	8,7
5% KCl	772,47	1,91	346,2	17,3
7,5% KCl	764,58	1,90	345,4	25,9
10% KCl	756,70	1,89	344,73	34,47

Cada pastas produzida foi caracterizada por meio de ensaios reológicos (água livre, reologia e peso específico) e mecânicos (compressão axial e tração por compressão diametral).

4.3. Preparo das Pastas de Cimento

Nesta etapa foram utilizados o misturador (Figura 29), espátula (Figura 30) e funil (Figura 31).



Figura 29. Misturador.



Figura 30. Espátula.



Figura 31. Funil.

O cimento foi pesado à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. A água foi pesada diretamente no misturador à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ e em seguida, foram adicionados o aditivo e o sal no misturador nas quantidades determinadas.

A água, aditivo e sal foram misturados durante 1 minuto na velocidade de (4000 ± 200) rpm. Posteriormente, ligou-se o misturador na velocidade de (4000 ± 200) rpm e lançou-se neste a amostra de cimento com auxílio do funil e da espátula no tempo de 15s. Após o cimento ter sido adicionado à mistura, o copo do misturador foi tampado e continuou-se a agitação na velocidade de (12000 ± 500) rpm durante 35s, desligando em seguida o misturador.

A pasta de referência é composta de cimento, água e aditivo. Nas pastas salinas estudadas acrescentou-se sal. O cimento utilizado nos testes de laboratório foi o cimento especial classe G altamente resistente a sulfatos. A água utilizada é deionizada. Durante a mistura dos componentes da pasta pode haver a incorporação de ar e, por isso, utilizou-se o aditivo anti-espumante que produz uma redução na tensão superficial e com isso a película de líquido não consegue conter o ar encapsulado, e a espuma se destrói. Foram utilizados os sais cloreto de sódio ou Halita (NaCl) e cloreto de potássio ou Silvita (KCl).

A homogeneização da pasta de cimento faz-se necessária para garantir sua homogeneidade, uma vez que durante o seu preparo pode haver concentração de grãos ou mesmo segregação.

Nesta etapa foi utilizado o consistômetro atmosférico (Figura 32).



Figura 32. Consistômetro Atmosférico.

O procedimento de homogeneização requer as seguintes etapas:

- Verter a pasta para a célula do consistômetro atmosférico, pré-aquecido a 80°F (27°C), até o nível apropriado, indicado por meio de um sulco ao redor da parte interna da célula. Não exceder em 1 minuto nesta operação;
- Montar o conjunto da célula e dar partida ao motor de agitação;
- O processo de homogeneização deve ter duração de 20 minutos, mantendo a temperatura do banho de 80°F (27°C);
- Após a homogeneização, desmontar o conjunto, retirar a palheta e agitar a pasta na célula com o auxílio de uma espátula por 5 segundos para assegurar sua uniformidade, antes de vertê-la para o recipiente de teste.

4.4. Metodologias de Ensaio

4.4.1. Água Livre

A água livre consiste em um parâmetro importante na indústria de petróleo, onde pouco adianta selecionar uma pasta de cimento com elevada resistência, se durante a operação não for estável e com elevado percentual de água livre. Testes API (American Petroleum Institute) definem o percentual máximo de Água Livre permitido.

Em uma pasta para cimentação de um poço de petróleo, onde os sólidos não estejam completamente dispersos, pode ocorrer migração ascendente da água. A água acumula-se em bolsões nas partes mais elevadas da coluna de cimento e em uma camada sobrenadante no topo. Esse fenômeno pode criar canais e alterar a pasta ao longo da coluna cimentada.

Portanto, este teste tem por objetivo inferir o percentual de água livre na pasta em questão. A água livre consiste em toda a água exsudada da pasta, isto é, a água não utilizada nas reações de hidratação do cimento.

Neste ensaio foram utilizados a proveta de vidro (Frasco de Erlenmeyer – Figura 33), Balança de precisão digital (Figura 34), espátula (Figura 26) e filme selante (Figura 35).

A Figura 33 mostra a Proveta de vidro (Frasco de Erlenmeyer).



Figura 33. Frasco de Erlenmeyer.

A Figura 34 mostra a balança de precisão digital.



Figura 34. Balança Digital.

A Figura 35 mostra o filme selante.



Figura 35. Filme Selante.

A pasta de cimento é previamente preparada e homogeneizada. Em seguida se verte 760g da pasta na proveta, com margem de tolerância de 5g. A proveta deve ser vedada, para impedir a evaporação da água exsudada, e assentada em um local isento de vibrações (Figura 36).



Figura 36. Ensaio de Água Livre.

Ao fim de duas horas, a água exsudada deve ser retirada com uma seringa, e seu peso medido dividindo-se o valor encontrado pelo peso inicial da pasta (760 gramas) encontra-se o valor do percentual de água livre.

4.4.2. Reologia

A reologia é de fundamental importância, pois permite saber as propriedades do fluido e como este vai se comportar durante o bombeio da pasta. Existem alguns modelos matemáticos que descrevem o fluxo dos fluidos. Um deles é o modelo Newtoniano no qual se tem uma relação direta entre a tensão aplicada e a velocidade das camadas. Entretanto, esse modelo não serve para descrever o comportamento de todos os tipos fluidos. Alguns fluidos precisavam de uma tensão mínima para escoar, outros não apresentam um comportamento linear.

Desenvolveram-se então modelos chamados de não newtonianos. Dentre eles temos o modelo de Bingham. Neste, a velocidade ainda é função linear da tensão, porém se introduziu uma constante chamada de limite de escoamento, que é uma tensão inicial mínima para começar a escoar o fluido. Outro ponto interessante é que a tensão

próxima ao centro do fluxo pode ser baixa demais para que comece o escoamento laminar, especialmente se o fluido tiver uma tensão de cisalhamento alta. Isso significa que próximo às paredes o fluido se apresentará com o fluxo laminar, mas próximo ao centro, não haverá tensão cisalhante suficiente para que as camadas escorreguem umas sobre as outras funcionando como um fluxo tampão.

Entretanto, alguns fluidos não apresentavam o comportamento anterior, apresentando aumento ou diminuição da resistência ao fluxo com o aumento da tensão aplicada. Esses fluidos foram estudados por Ostwald que criou o modelo de Potencia.

O ensaio de reologia tem por objetivo determinar as propriedades e parâmetros reológicos das pastas de cimento utilizando um viscosímetro rotativo, de acordo com o Modelo de Bingham. Os parâmetros são a viscosidade plástica (VP) e o limite de escoamento (LE). Determina-se também o gel inicial (Gi) e gel final (Gf). Tais parâmetros são utilizados para a determinação do regime de escoamento e previsão das pressões durante a circulação da pasta.

O viscosímetro utilizado foi o Chandler que está baseado no projeto original da Socony_Mobil Oil Company, cuja intenção era medir as viscosidades aparente e plástica, e o limite de escoamento dos fluidos de perfuração nos campos de petróleo. Nele a taxa de cisalhamento é controlada, isto é, o cilindro externo gira, enquanto o interno fica parado, a uma velocidade constante pré-selecionada. Uma força resultante do arraste, função da velocidade e viscosidade do fluido, é transmitida pelo fluido e age sobre o cilindro interno, estando conectado a uma mola de torção através de um eixo, que se apóia na parte superior e gira livre através de um sistema de rolamentos.

O equipamento utilizado foi o Viscosímetro, conforme Figura 37.



Figura 37. Viscosímetro.

Os ensaios de reologia foram realizados da seguinte forma: A pasta foi previamente preparada e homogeneizada. O copo cheio de água foi aquecido até a

temperatura de 80°F (A temperatura do copo durante todo o experimento deve se manter em 80 ±5°F). Então a pasta foi vertida no copo seco até a linha demarcada, logo após sua homogeneização. O copo é então instalado na base do viscosímetro e suspenso até que o nível do líquido esteja alinhado com a marcação do rotor.

O copo deve ser suspenso com o aparelho ligado à velocidade de 300 rpm, e nesta velocidade se faz a primeira medição após 60 segundos. Em seguida o aparelho é posto na velocidade de 200 rpm e após 20 segundos se faz a segunda medição. Novamente a velocidade é mudada para 100 rpm e após 20 segundos se faz a terceira medição.

Após essa última medição deve-se fazer o condicionamento da mistura para leitura dos géis, deixando sobre rotação de 600 rpm por 1 minuto. Então o motor é desligado por 10 segundos e então se liga a 3 rpm para medir a máxima deflexão alcançada, registrando o valor para posterior cálculo do gel inicial. O motor é então desligado por 10 minutos e ao fim o viscosímetro é ligado à velocidade de 3 rpm para que seja registrada a deflexão máxima que será utilizada para o cálculo do gel final.

Após a realização dos ensaios e aquisição das medidas de deflexão da mola, nas diferentes rotações, inicia-se a próxima etapa que consiste em calcular os parâmetros reológicos nas rotações de 300, 200 e 100 rpm. Inicialmente calcula-se a taxa de deformação através das Equações 1 e 2:

$$\omega = \frac{2\pi \times \Omega}{60} \quad \text{Equação 1}$$

$$\gamma = \frac{2\omega R_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

γ – Taxa de deformação (s⁻¹);

ω – Velocidade angular (s⁻¹);

Ω - Velocidade de rotação do viscosímetro (rpm);

R_0 – Raio interno do rotor (cm);

R_i – Raio interno do “bob” (cm);

Em seguida, calcula-se a tensão de cisalhamento através da Equação 3:

$$\tau = F_{\tau} \times F_m \times \theta \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

τ – Tensão de cisalhamento (lbf/100pés² ou Pa);

F_{τ} – Fator da tensão de cisalhamento do viscosímetro para uma dada combinação “rotorbob”;

F_m – Coeficiente da mola de torção do instrumento;

θ – Leitura do viscosímetro em graus.

Os valores de F_{τ} e F_m são retirados das Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17. BOB (Fonte: Campos *et al.*, 2005).

BOB	F_τ - lbf/ 100 pés²	F_τ - (Pa)
B1	1,067	0,511
B2	2,106	1,083
B3	4,269	2,044

Tabela 18. Tipo de Mola (Fonte: Campos *et al.*, 2005).

Tipo de Mola	F_{mola}
F0,2	0,2
F0,5	0,5
F1	1
F2	2
F3	3
F4	4
F5	5
F10	10

Com os resultados da taxa de deformação e de tensão de cisalhamento é possível a determinação dos parâmetros reológicos utilizando-se o modelo de Bingham, modelo mais utilizado para determinar o comportamento reológico de pastas de cimento. Com tensões baixas, a pasta de cimento é muito viscosa assemelhando-se a um sólido elástico. A Equação 4 consiste na expressão matemática que define o fluido de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

τ – Tensão de cisalhamento (Pa ou lbf/100pés²);

τ_0 – Limite de escoamento (Pa ou lbf/100pés²);

μ – Viscosidade plástica (Pa.s ou cP);

γ – Taxa de deformação (s⁻¹).

4.4.3. Peso Específico

O peso específico da pasta de cimento foi determinado utilizando-se a balança de lama, conforme mostrado na Figura 38 e bastão de vidro (Figura 39) com diâmetro de 6 mm e tamanho de 25 cm



Figura 38. Balança de Lama.

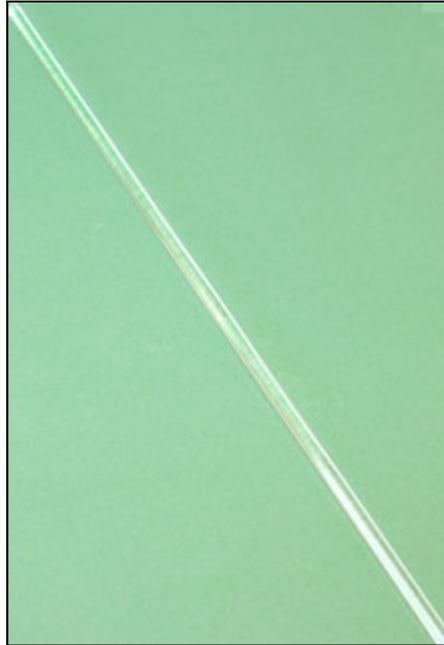


Figura 39. Bastão de Vidro.

A balança foi lavada e secada e colocada sobre sua base. Em seguida, a pasta de cimento previamente preparada e homogeneizada foi vertida no copo da balança de lama até um nível ligeiramente abaixo de sua borda (cerca de 6 mm). Então se faz necessária a verificação da existência de bolhas através do bastão de vidro. Em seguida se coloca mais um pouco de pasta no copo. A tampa é colocada e a balança é lavada para que em seguida, novamente sobre sua base, seja feita a leitura de seu peso.

4.4.4. Resistência à Compressão Axial

Este ensaio tem por objetivo inferir a resistência à compressão axial da pasta no estado endurecido.

Foram utilizados a Prensa *Shimadzu UH-F* 1000 KN (Figura 40), moldes cilíndricos (Figura 41) e banho térmico (Figura 43).



Figura 40. Prensa *Shimadzu UH-F 1000 KN*.



Figura 41. Molde Cilíndrico.

A moldagem dos corpos de prova para este ensaio seguiu as etapas abaixo:

- Foram utilizados moldes cilíndricos de dimensões 10 x 5 (altura e diâmetro) cm;



Figura 42. Moldes.

- A pasta de cimento foi preparada;
- Colocar uma fina camada de graxa nas superfícies internas e juntas dos moldes;
- Verter a pasta nos moldes em duas camadas com alturas aproximadamente iguais;
- Imediatamente após verter a primeira camada, homogeneizar a pasta com o auxílio de um bastão de vidro, girando de maneira uniformemente distribuída, durante 45 segundos;

- Misturar no próprio copo do misturador, com o auxílio de uma espátula, o restante de pasta necessário para formar a segunda camada, de modo a evitar a segregação;
- Encher o molde até transbordamento e repetir o procedimento de homogeneização adotado para a primeira camada. Lembrar que o fundo do bastão de vidro deve coincidir com o final da segunda camada;
- Após a etapa de homogeneização, remover o excesso de pasta por meio do deslizamento de uma régua metálica sobre a superfície do molde. Cobrir o molde com a placa superior engraxada;
- Os corpos de prova moldados ficaram na cura térmica ($60 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$) durante 7 dias;



Figura 43. Banho Térmico.

- Os corpos de prova moldados devem ser retirados do banho térmico. Para tanto, deve-se desligar o banho com aproximadamente 12 horas de antecedência;
- Após a desmoldagem, os corpos de prova deverão ser faceados no torno mecânico, medidos para que então seja realizado o ensaio na prensa *Shimadzu* de 1000 kN (Figura 44);



Figura 44. Ensaio de Resistência à Compressão.

O ensaio foi realizado com controle de deslocamento a uma velocidade de 0,12 mm/min.

A partir da curva tensão *versus* deformação, obtida no ensaio de compressão uniaxial, foi possível determinar o módulo de elasticidade corda, de acordo com a ASTM C 469 (1994), com a Equação 5.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade (GPa);

σ – Tensão aplicada;

ε – Deformação longitudinal (adimensional).

O coeficiente de Poisson foi determinado de acordo com a Equação 6.

$$\nu = \frac{(\varepsilon_{l2} - \varepsilon_{l1})}{(\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1})} \quad \text{Equação 6}$$

ν – Coeficiente de Poisson

ε_l - Deformação transversal

ε_a - Deformação longitudinal

4.4.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio tem por objetivo inferir a resistência à tração através de compressão diametral.

Foram utilizados a Presa *Shimadzu UH-F* 1000 KN, moldes cilíndrico, suporte para o ensaio, banho térmico e espátula.

A realização deste ensaio passa pelas seguintes etapas:

- Preparar a pasta de cimento;
- Curar a pasta conforme ensaio de compressão axial (Cura térmica à $60 \pm 0,5^\circ\text{C}$ durante 7 dias);
- Desmoldar o corpo de prova e cortá-lo em discos em dimensões de 2 para 1 onde o diâmetro é a maior dimensão (em acordo com a NBR 7222/1994);
- Ajustar os discos no suporte para ensaio de tal forma que o contato do corpo de prova se de através de duas geratrizes diametralmente opostas.

A Figura 45 mostra o ensaio.



Figura 45. Ensaio de Tração por Compressão Diametral.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação 7.

$$\sigma_t = \frac{2.F_T}{D.L.\pi}$$

Equação 7

Onde:

σ_t – Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F_r – Carga de ruptura do corpo-de-prova (N);

D – Diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L – Espessura do corpo-de-prova (mm).

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos nos ensaios no laboratório de estruturas (LABEST) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Fundão (UFRJ). Além disso, as análises são baseadas através da análise estatística (Anexo 3) feita ao nível de significância de 0,05.

5.1. Percentual de Água Livre

Quanto menor é o percentual de água livre, melhor a eficiência da pasta para cimentação de poços de petróleo. Este parâmetro pode ser fator decisivo entre uma pasta boa ou uma pasta ruim para poços direcionais e verticais. Desta forma, este trabalho analisa a influência do sal no teor de água livre.

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de água livre com a pasta de cloreto de sódio, bem como o Desvio Padrão (DP).

Tabela 19. Percentual de Água Livre para Pastas com NaCl.

% Água Livre					
% NaCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	1,44	1,60	1,66	1,50	0,11
5	1,20	0,95	1,09	1,08	0,12
10	0,76	0,75	0,73	0,74	0,01
12,5	1,16	1,06	1,76	1,11	0,38
15	1,21	2,03	1,85	1,90	0,43
17,5	2,06	2,31	1,98	2,12	0,18

O Gráfico 2 mostra a variação do percentual de água livre para as pastas com NaCl.

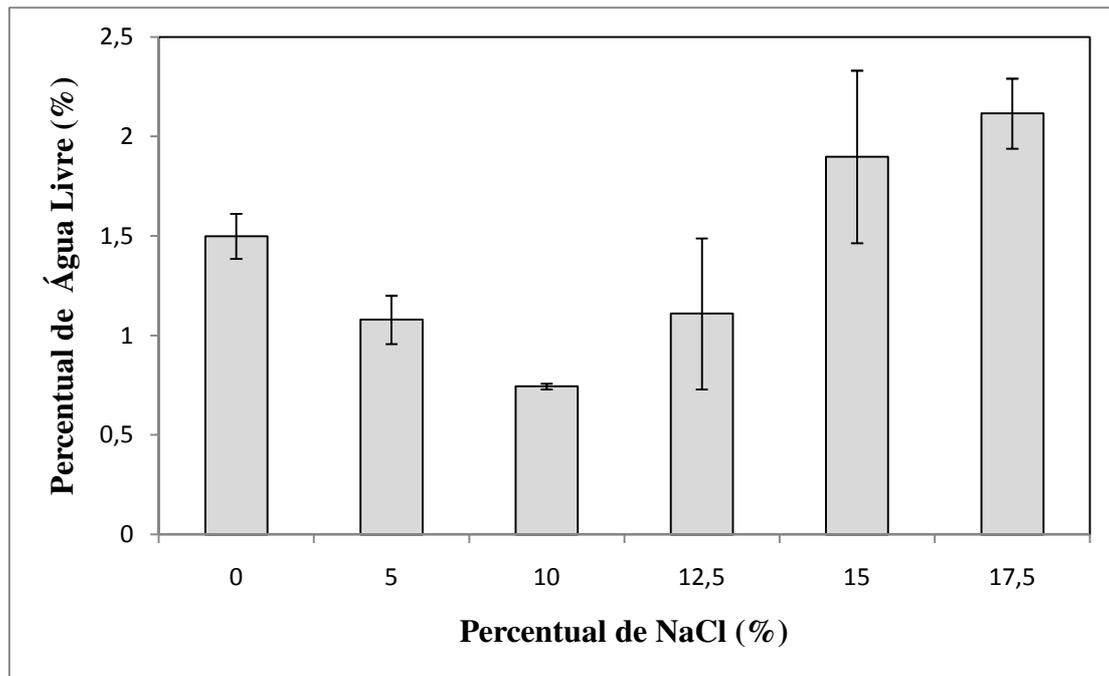


Gráfico 2. Variação do Percentual de Água Livre para Pasta com NaCl.

O acréscimo de NaCl até 12,5% em peso de água proporcionou queda no teor de água livre quando comparada à pasta de referência, o que consiste em um efeito benéfico para a pasta. Porém a pasta contendo 10% de NaCl apresentou o menor teor de água livre. Para percentuais acima de 15% deste sal a pasta apresentou aumento no teor de água livre.

A pasta contendo 10% de NaCl apresentou queda de 50,4% no percentual de água livre quando comparada com a pasta de referência.

Através da análise estatística (Anexo 3), conclui-se que somente o resultado para a pasta com 10% de NaCl é estatisticamente diferente do resultado obtido para a pasta de referência. Desta forma, o acréscimo de cloreto de sódio na pasta de cimento proporcionou a redução do teor de água livre, que consiste em um efeito positivo.

A Tabela 20 mostra os resultados obtidos nos ensaios de água livre com a pasta de cloreto de potássio, bem como o desvio padrão.

Tabela 20. Percentual de Água Livre para Pastas com KCl.

% Água Livre					
% KCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	1,44	1,60	1,66	1,46	0,11
2,5	1,20	1,10	1,80	1,15	0,38
5	0,87	1,03	1,00	0,97	0,08
7,5	0,35	0,36	0,45	0,39	0,05
10	0,64	0,43	0,56	0,54	0,11

O Gráfico 3 mostra a variação do percentual de água livre para as pastas com KCl.

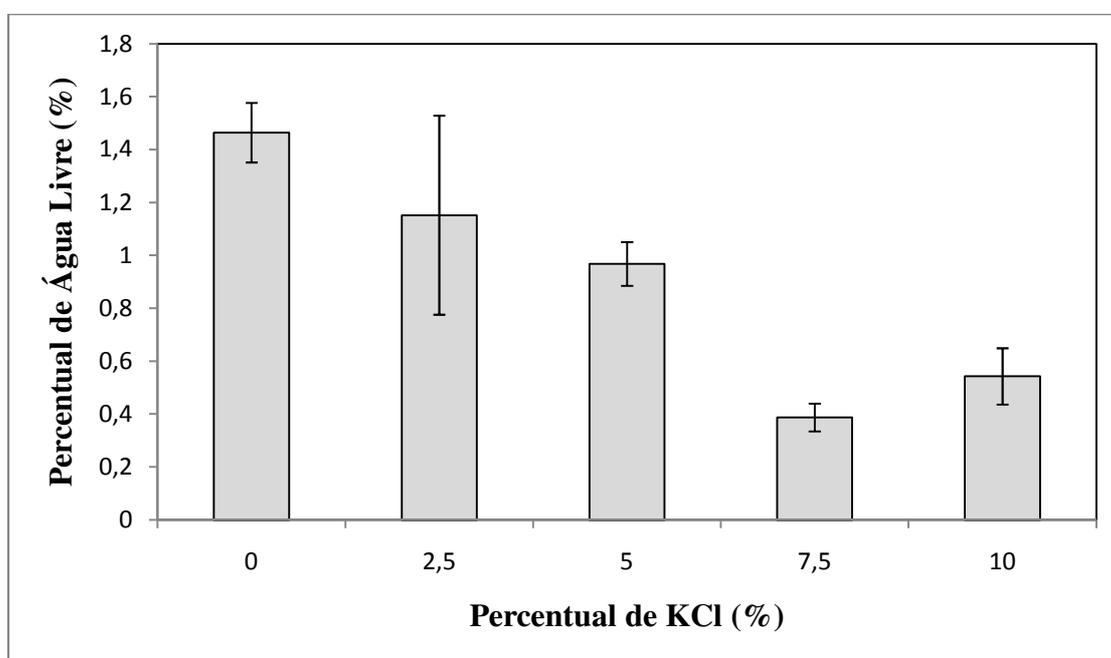


Gráfico 3. Variação do Percentual de Água Livre para Pasta com KCl.

Todas as concentrações testadas apresentaram redução no teor de água livre. Porém, a pasta contendo 7,5% em peso de água de KCl apresentou o menor valor para o teor de água livre.

Desta forma, o acréscimo de cloreto de potássio na pasta de cimento proporcionou redução no teor de água livre, uma vez que exceto o resultado para a pasta com 2,5% deste sal não foi estatisticamente diferente. Esta redução consiste em um efeito positivo para a pasta de cimento.

A pasta contendo 7,5% de KCl apresentou queda de 74% em relação a pasta de referência.

5.2. Reologia

A viscosidade plástica consiste em um parâmetro que descreve as características do fluxo depois que este tenha iniciado. Representa a tensão necessária para fornecer uma determinada taxa de cisalhamento. Na prática, a viscosidade plástica controla a taxa de bombeamento e a facilidade de acabamento na superfície.

O limite de escoamento representa a mínima tensão necessária para obter o escoamento do material.

As Tabelas 21e 22 mostram os resultados obtidos nos ensaios de reologia para a pasta com cloreto de sódio. Também se encontram nestas tabelas o desvio padrão obtido para os valores de Viscosidade Plástica (VP) e Limite de Escoamento (LE). A Tabela 21 apresenta os resultados para viscosidade plástica. O Gráfico 4 mostra a variação da viscosidade plástica para as pastas contendo NaCl.

Tabela 21. Viscosidade Plástica para Pastas com NaCl.

Viscosidade Plástica (mPa.s)					
% NaCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	100,60	88,60	93,10	94,10	6,06
5	70,50	63,00	66,75	66,75	3,75
10	60,00	61,50	60,75	60,75	0,75
12,5	51,00	61,50	56,25	56,25	5,25
15	55,50	64,50	60,00	60,00	4,50
17,5	58,50	58,50	58,50	58,50	0,00

O Gráfico 4 mostra a variação da viscosidade plástica para as pastas contendo NaCl.

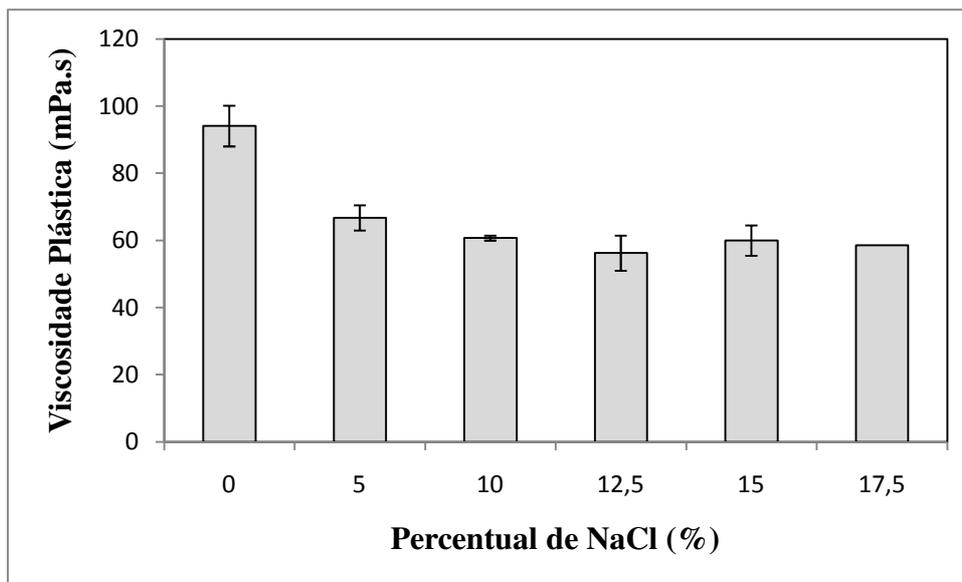


Gráfico 4. Variação da Viscosidade Plástica para Pastas com NaCl.

O acréscimo de NaCl proporcionou redução na viscosidade plástica, em relação à pasta de referência, para todas as concentrações testadas. O menor valor obtido foi para a pasta contendo 12,5% do sal em peso de água. Porém, há tendência de que o acréscimo de NaCl para concentrações acima de 10% não proporcionem mudanças neste parâmetro.

Todos os resultados obtidos comparados com a pasta de referência foram estatisticamente significativos. Desta forma, a queda da viscosidade plástica com o acréscimo de sal indica que a pasta terá menor resistência ao fluxo, isto é, o fluxo da pasta de cimento no anular do poço estará facilitado. A pasta com 12,5% de NaCl apresentou queda de 40,2% em relação a pasta de referência. A Tabela 22 apresenta os resultados para limite de escoamento.

Tabela 22. Limite de Escoamento para Pastas com NaCl.

Limite de Escoamento (Pa)					
% NaCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	40,03	39,69	39,35	39,69	0,34
5	26,06	24,87	25,47	25,47	0,60
10	20,61	20,95	20,78	20,78	0,17
12,5	18,23	18,91	18,57	18,57	0,34
15	15,84	18,06	16,95	16,95	1,11
17,5	14,31	14,65	14,48	14,48	0,17

O Gráfico 5 apresenta a curva que mostra a variação do limite de escoamento para a pasta de cloreto de sódio. Através deste gráfico observa-se que à medida em que o percentual de NaCl na pasta aumenta, há redução no limite de escoamento.

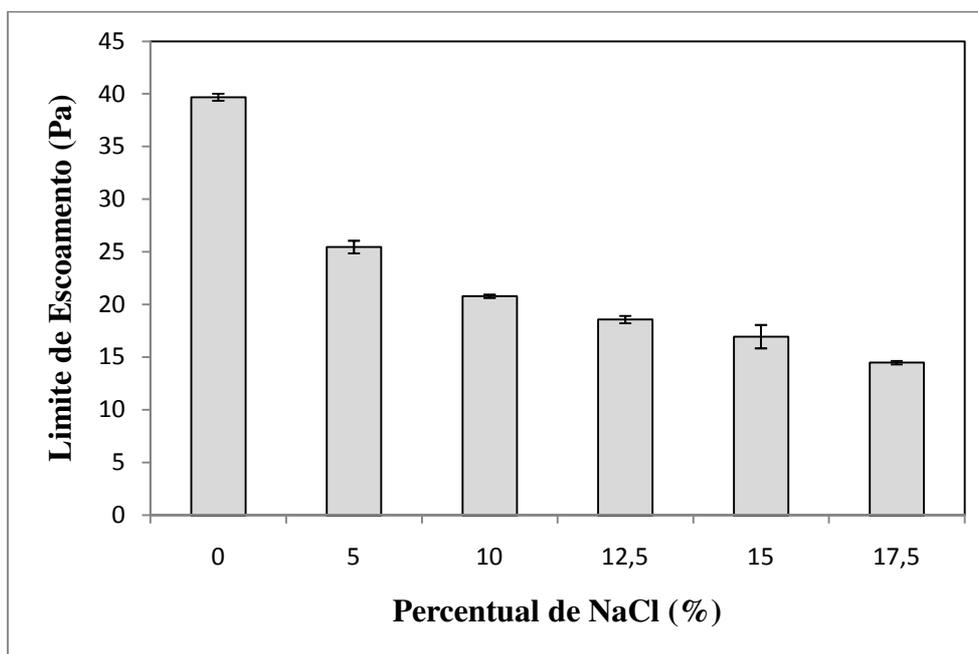


Gráfico 5. Variação do Limite de Escoamento para Pastas com NaCl.

A pasta contendo 17,5% apresentou queda de 63,5% em relação a pasta de referência. Além disso, os resultados obtidos para as pastas salinas são significativamente diferentes quando comparados à pasta de referência.

As Tabelas 23 e 24 mostram os resultados obtidos nos ensaios de reologia para a pasta com cloreto de potássio. Também se encontram, nestas tabelas, os valores para desvio padrão obtidos para a viscosidade plástica e limite de escoamento.

A Tabela 23 mostra os resultados obtidos para a viscosidade plástica.

Tabela 23. Viscosidade Plástica para Pastas com KCl.

Viscosidade Plástica (mPa.s)					
% KCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	100,60	88,60	93,10	94,10	6,06
2,5	70,50	60,00	65,25	65,25	5,25
5	49,50	45,00	47,25	47,25	2,25
7,5	48,00	51,00	49,50	49,50	1,50
10	48,00	49,50	48,75	48,75	0,75

O Gráfico 6 apresenta a variação da viscosidade plástica obtida para pasta de cloreto de potássio.

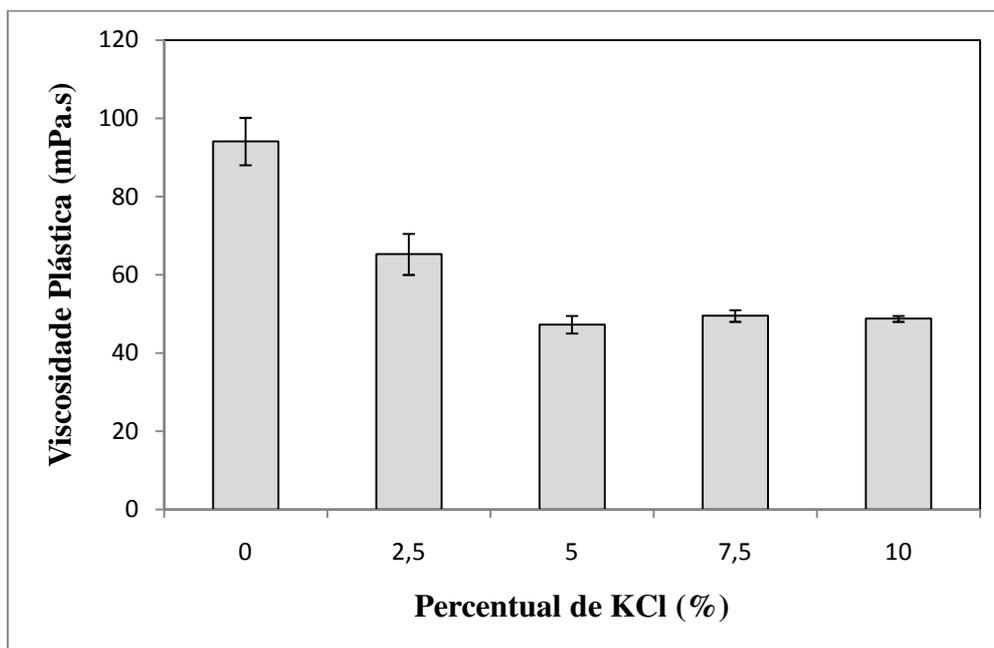


Gráfico 6. Variação da Viscosidade Plástica para Pastas com KCl.

O acréscimo de KCl proporcionou queda nos valores obtidos para viscosidade plástica. A pasta contendo 5% de KCl apresentou o menor valor. Porém, para concentrações acima de 5% há tendência da viscosidade plástica permanecer constante.

A pasta contendo 5% de KCl apresentou queda de 49,8% em relação à pasta de referência.

Todos os resultados comparados com a pasta de referência são estatisticamente diferentes, desta forma, o acréscimo deste sal proporciona redução na viscosidade plástica. Isso representa um efeito positivo para o fluxo da pasta no anular do poço.

A Tabela 24 mostra os resultados obtidos para o limite de escoamento.

Tabela 24. Limite de Escoamento para Pastas com KCl.

Limite de Escoamento (Pa)					
% KCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	40,03	39,69	39,35	39,69	0,34
2,5	18,06	24,70	21,38	21,38	3,32
5	27,59	28,45	28,02	28,02	0,43
7,5	40,37	39,35	39,86	39,86	0,51
10	46,33	44,97	45,65	45,65	0,68

O Gráfico 7 mostra a variação do limite de escoamento para a pasta de cloreto de potássio.

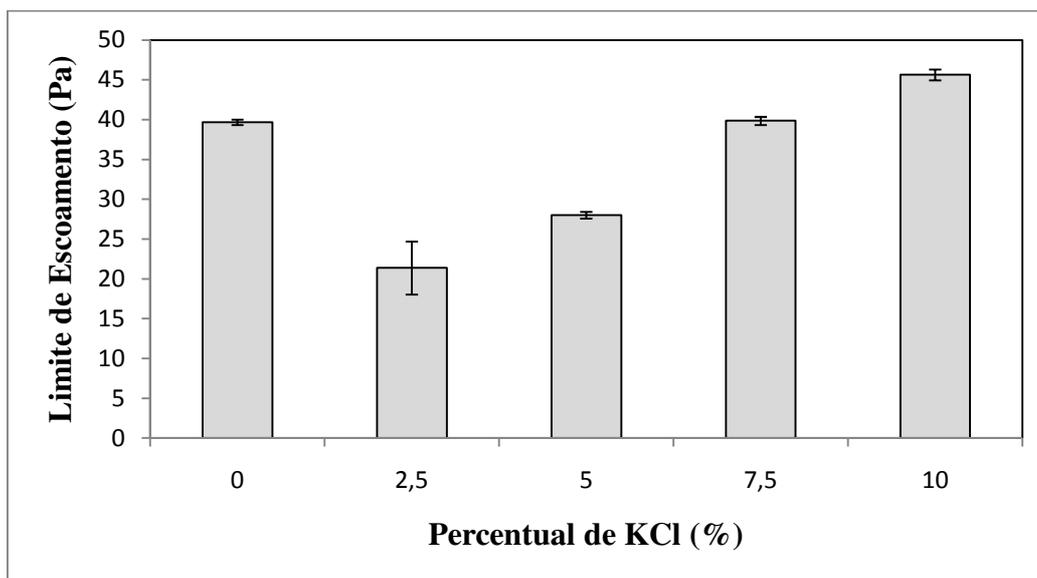


Gráfico 7. Variação do Limite de Escoamento para Pastas com KCl.

O acréscimo de KCl até a concentração de 5% em peso de água proporcionou redução no limite de escoamento. Concentrações acima de 7,5% proporcionam aumento neste parâmetro. A pasta contendo 2,5% de KCl apresentou queda de 46,4% em relação à pasta de referência.

Somente o resultado para a pasta contendo 7,5% deste sal não obteve resultado diferente ao nível de significância considerado. Desta forma, o efeito do sal em pequenas quantidades (2,5% e 5% de KCl) é positivo, uma vez que é necessário uma menor tensão de cisalhamento para que a pasta entre em movimento, enquanto que para grandes quantidades (10% de KCl) o efeito é negativo.

5.3. Peso Específico

O ensaio de peso específico tem o objetivo de verificar se a pasta ficará mais leve ou mais pesada com o acréscimo de sal em sua composição.

A Tabela 25 mostra os resultados obtidos no ensaio para determinação do peso específico da pasta de cloreto de sódio.

Tabela 25. Peso Específico para Pastas com NaCl.

Peso Específico (Kg/m³)					
% NaCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	1586,44	1581,46	1591,43	1586,44	4,99
5	1581,46	1576,47	1571,48	1576,47	4,99
10	1581,46	1576,47	1571,48	1576,47	4,99
12,5	1566,49	1576,47	1556,51	1566,49	9,98
15	1571,48	1566,49	1561,50	1566,49	4,99
17,5	1566,49	1566,49	1566,49	1566,49	0,00

O Gráfico 8 mostra a variação do peso específico para as pastas contendo NaCl.

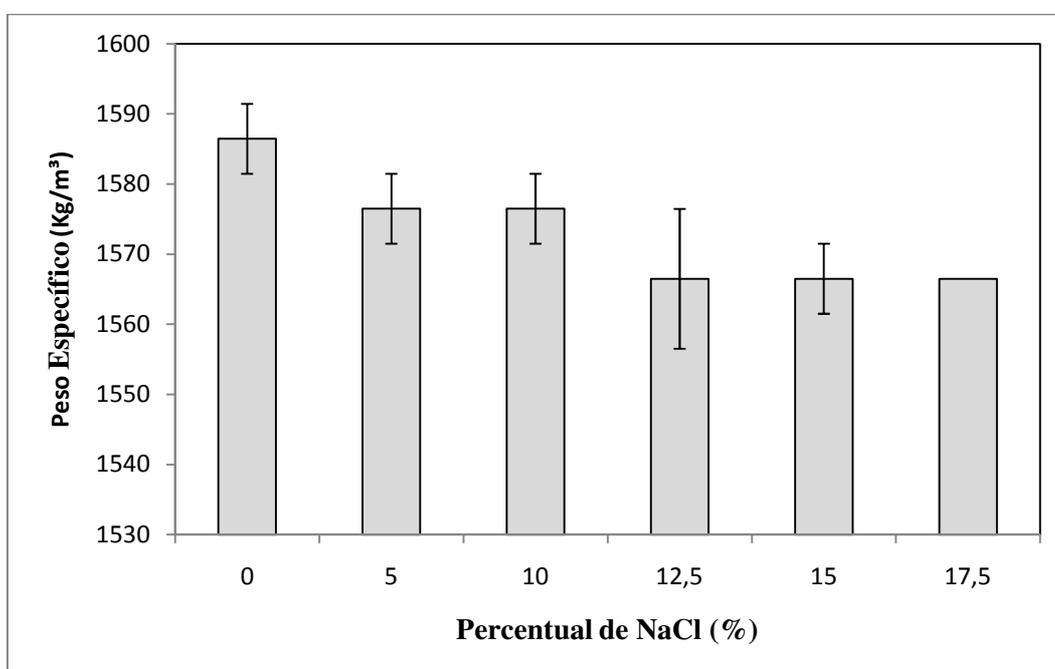


Gráfico 8. Variação do Peso Específico para Pastas com NaCl.

O acréscimo de NaCl proporcionou redução no peso específico, sendo o valor mínimo obtido nas pastas contendo 12,5, 15 e 17,5% deste sal.

As pastas contendo 12,5, 15 e 17,5% apresentaram queda de 1,3% em relação à pasta de referência.

A Tabela 26 mostra os resultados obtidos no ensaio para determinação do peso específico da pasta de cloreto de potássio.

Tabela 26. Peso Específico para Pastas com KCl.

Peso Específico (Kg/m³)					
% KCl	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
0	1586,44	1591,43	1581,46	1586,44	4,99
2,5	1561,50	1556,51	1551,52	1556,51	4,99
5	1571,48	1566,49	1561,50	1566,49	4,99
7,5	1581,46	1571,48	1576,47	1576,47	4,99
10	1581,46	1571,48	1576,47	1576,47	4,99

O Gráfico 9 mostra a variação do peso específico para as pastas contendo KCl.

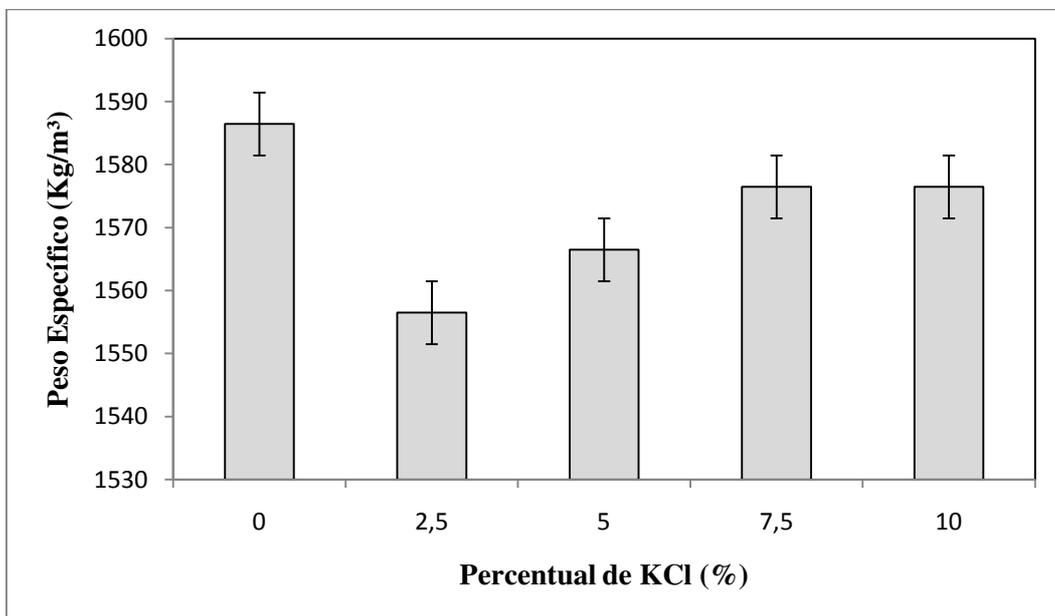


Gráfico 9. Variação do Peso Específico para Pastas com KCl.

O acréscimo de KCl proporcionou redução no peso específico, sendo o valor mínimo obtido na pasta contendo 2,5% deste sal.

A pasta com 2,5% de KCl apresentou queda de 0,3% em relação a pasta de referência.

Esta mudança observada nos valores para o peso específico, possivelmente se deve a mudança na composição das pastas.

5.4. Resistência à Compressão Axial

Através dos ensaios de compressão axial, serão analisadas as propriedades de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, enquanto que no ensaio de resistência à tração por compressão diametral serão analisados os valores obtidos para tração.

A força de compressão representa a máxima resistência à compressão suportada pela pasta. Neste trabalho, é analisada a influência do sal neste parâmetro. Este consiste em um importante parâmetro na cimentação de poços, especialmente em zonas salinas onde o efeito de fluência das rochas é significativo.

O módulo de elasticidade é obtido através da razão entre a tensão e a deformação obtidas dentro do regime elástico. Este parâmetro fornece uma medida da rigidez do material. Consiste em uma propriedade intrínseca do material que depende da composição química, microestrutura e características porosas.

O coeficiente de Poisson consiste na razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal.

A Tabela 27 mostra os resultados dos ensaios, de resistência à compressão axial, realizados para a pasta de cloreto de sódio. Também se encontra nesta tabela o desvio padrão desses resultados.

Tabela 27. Resistência à Compressão para Pastas com NaCl.

Resistência à Compressão - (Mpa)					
% NaCl	CP 01	CP 02	CP 03	Média	DP
0,00	48,55	51,65	49,14	49,78	1,65
5,00	43,33	44,61	37,06	41,67	4,04
10,00	36,80	39,20	37,55	37,85	1,23
12,50	35,42	39,81	34,94	36,72	2,69
15,00	34,95	37,14	35,66	35,92	1,12
17,50	32,96	31,58	35,18	33,24	1,82

O Gráfico 10 apresenta a variação da resistência à compressão para as pastas contendo NaCl.

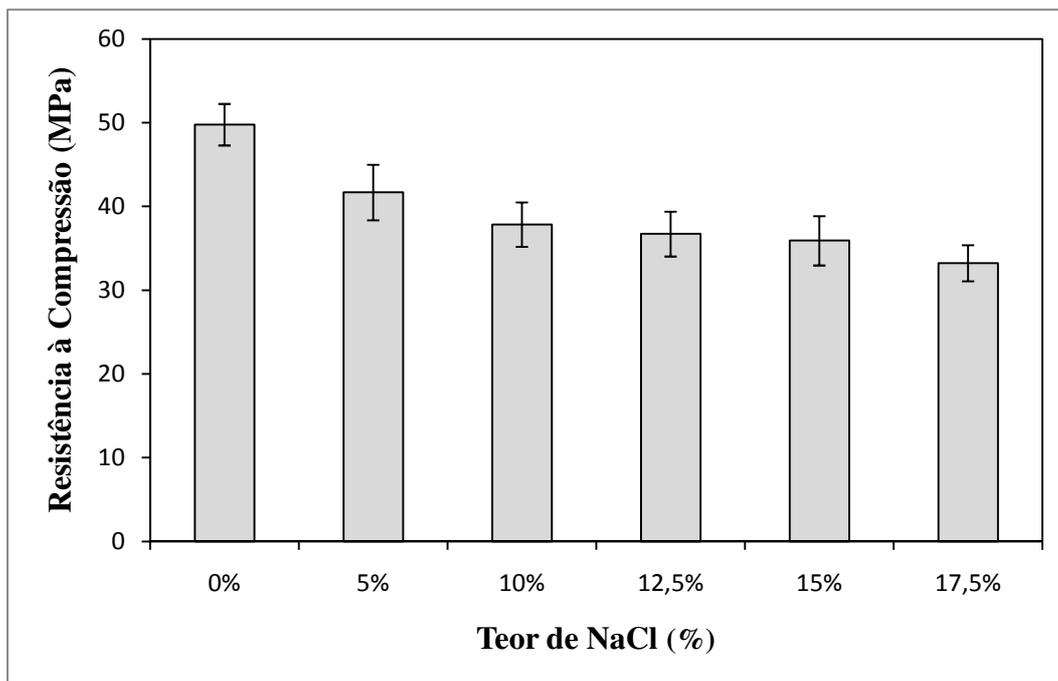


Gráfico 10. Variação da Resistência à Compressão para Pastas com NaCl.

O acréscimo de sal proporcionou queda na resistência à compressão. O valor mais alto observado foi para a pasta de referência com 49,78 MPa enquanto que o menor valor observado foi de 33,24 MPa para a pasta contendo 17,5% de NaCl.

A pasta contendo 17,5% apresentou queda de 33,2% em relação a pasta de referência. A menor queda foi obtida com a pasta com 5% de NaCl (16,3% em relação a pasta de referência).

Os valores obtidos para as pastas salinas são estatisticamente diferentes (ver Anexo 3) ao nível de significância considerado. Desta forma, o acréscimo deste sal na composição da pasta proporcionou queda na resistência à compressão da pasta. Porém, os valores obtidos para as pastas salinas, ainda estão em níveis aceitáveis para um poço de petróleo. De tal forma, que é preferível perder resistência à compressão e conter a migração de íons da rocha para a pasta do que continuar com a resistência inicial e ter a migração destes íons.

A Tabela 28 mostra os resultados dos ensaios, de resistência à compressão axial, realizados para a pasta de cloreto de potássio. Também se encontra nesta tabela o desvio padrão desses resultados.

Tabela 28. Resistência à Compressão para Pastas com KCl.

Resistência à Compressão - (Mpa)					
% KCl	CP 01	CP 02	CP 03	Média	DP
0,00	48,55	51,65	49,14	49,78	1,65
2,50	41,91	44,54	42,52	42,99	1,38
5,00	48,83	47,16	53,48	49,82	3,27
7,50	48,71	45,77	44,21	46,23	2,29
10,00	44,59	46,61	43,67	44,96	1,50

O Gráfico 11 apresenta a variação da resistência à compressão obtida para as pastas contendo KCl.

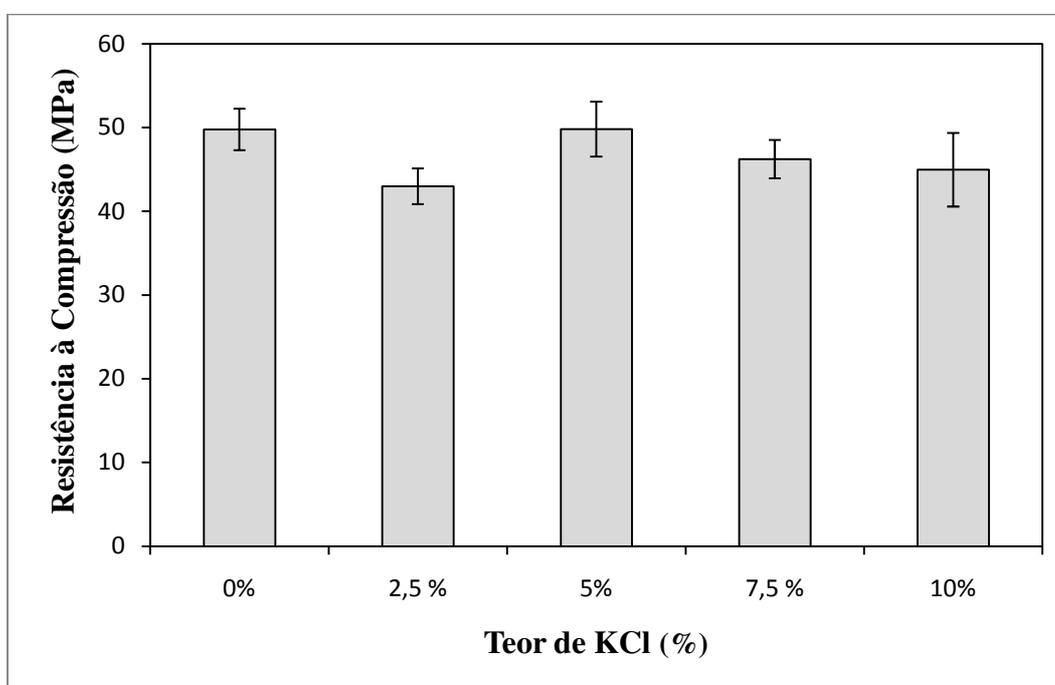


Gráfico 11. Variação da Resistência à Compressão para Pastas com KCl.

O menor valor obtido foi de 42,99 MPa para a pasta contendo 2,5% de KCl enquanto que o maior valor obtido foi de 49,82 MPa obtido para a pasta contendo 5% de KCl. Este valor é superior ao valor obtido para a pasta de referência. Com exceção da pasta contendo 5% de KCl, todas as pastas apresentaram queda em relação a pasta de referência.

A pasta contendo 5% de KCl apresentou aumento de 0,08% em relação a pasta de referência, enquanto que a pasta contendo 2,5% de KCl apresentou queda de 13,65% em relação a pasta de referência.

Somente a pasta com 2,5% de cloreto de potássio apresentou resultado significativamente diferente ao nível de 0,05, portanto, o acréscimo deste sal em pequenas quantidades proporciona queda na resistência à compressão da pasta. Porém, o valor obtido ainda consiste em valores aceitáveis na engenharia de poços de petróleo.

A Tabela 29 apresenta os valores do Módulo de Elasticidade (E) para os ensaios realizados com a pasta de cloreto de sódio.

Tabela 29. Módulo de Elasticidade para Pastas com NaCl.

Módulo de Elasticidade - E (Gpa)					
% NaCl	CP 01	CP 02	CP 03	Média	DP
0,00	14,27	14,18	14,48	14,31	0,15
5,00	13,28	13,38	12,87	13,18	0,27
10,00	13,52	13,21	13,36	13,36	0,16
12,50	11,91	12,30	12,43	12,21	0,27
15,00	12,56	11,91	13,53	12,67	0,82
17,50	12,82	12,95	12,79	12,85	0,08

O Gráfico 12 mostra a variação dos resultados para o módulo de elasticidade das pastas com NaCl.

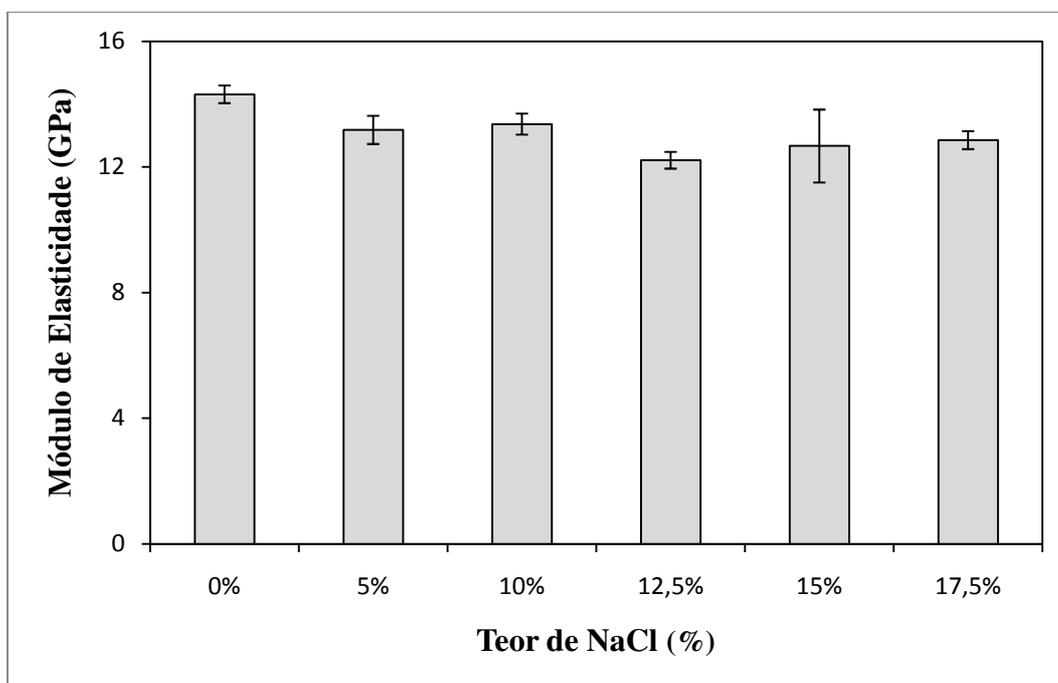


Gráfico 12. Variação do Módulo de Elasticidade para Pastas com NaCl.

Todas as pastas salinas apresentaram queda no módulo de elasticidade. O valor mínimo obtido foi de 12,21 GPa para a pasta contendo 12,5% de NaCl, enquanto que o valor máximo foi de 14,31 GPa para a pasta de referência. A pasta contendo 12,5% de NaCl apresentou queda de 14,7% em relação a pasta de referência. A menor queda obtida foi de 6,6 % para a pasta contendo 10% deste sal.

A Tabela 30 apresenta os valores do Módulo de Elasticidade (E) para os ensaios realizados com a pasta de cloreto de potássio.

Tabela 30. Módulo de Elasticidade para Pastas com KCl.

Módulo de Elasticidade - E (Gpa)					
% KCl	CP 01	CP 02	CP 03	Média	DP
0,00	14,27	14,18	14,48	14,31	0,15
2,50	13,95	12,96	13,61	13,51	0,50
5,00	12,90	12,77	12,76	12,81	0,08
7,50	12,34	12,48	12,01	12,28	0,24
10,00	11,22	11,85	11,69	11,59	0,33

O Gráfico 13 mostra a variação dos resultados para o módulo de elasticidade das pastas contendo KCl.

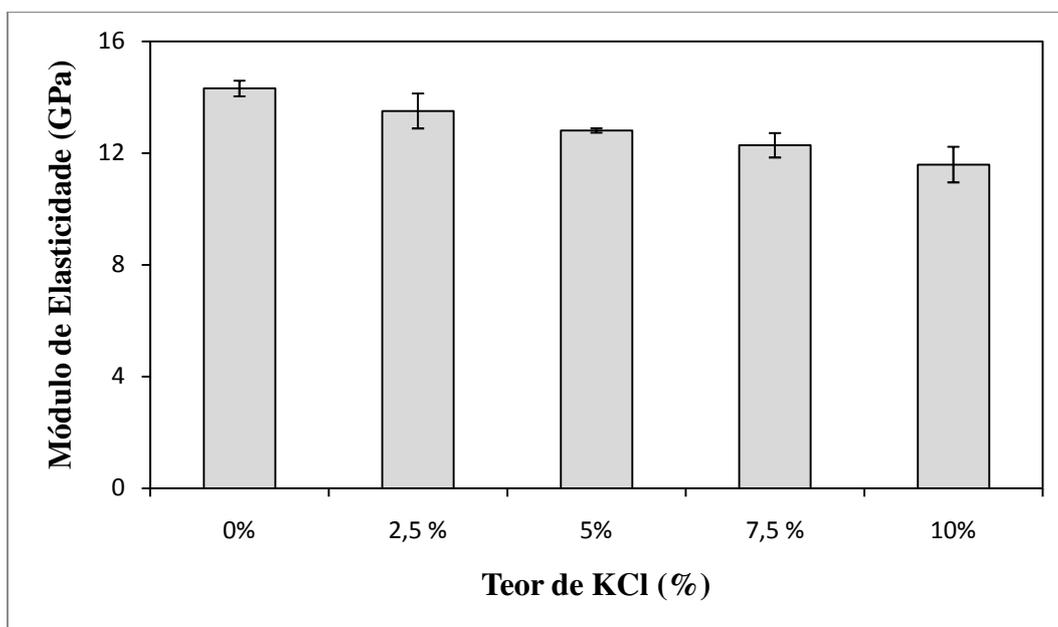


Gráfico 13. Variação do Módulo de Elasticidade para Pastas com KCl.

Todas as pastas testadas apresentaram queda no módulo de elasticidade. O valor mínimo de 11,59 GPa para a pasta contendo 10% de KCl, enquanto que o valor máximo

foi de 14,31 GPa para a pasta de referência. À medida que a concentração de KCl aumenta, o módulo de elasticidade cai.

A pasta contendo 10% de KCl apresentou queda de 19% em relação a pasta de referência. A menor queda foi de 5,6% para a pasta com 2,5% de KCl.

A queda, apesar de significativamente diferente para ambos os sais, não invalida sua utilização, pois os valores obtidos ainda são aceitáveis para a cimentação de poços de petróleo.

A Tabela 31 apresenta os valores do Coeficiente de Poisson (ν) para os ensaios realizados com a pasta de cloreto de sódio.

Tabela 31. Coeficiente de Poisson para Pastas com NaCl.

Coeficiente de Poisson - ν					
% NaCl	CP 01	CP 02	CP 03	Média	DP
0,00	0,27	0,26	0,27	0,27	0,01
5,00	0,25	0,26	0,25	0,25	0,01
10,00	0,30	0,28	0,27	0,28	0,02
12,50	0,27	0,26	0,26	0,26	0,01
15,00	0,31	0,25	0,28	0,26	0,03
17,50	0,27	0,27	0,28	0,27	0,01

O Gráfico 14 mostra a variação dos resultados para o coeficiente de Poisson apresentados na Tabela 31.

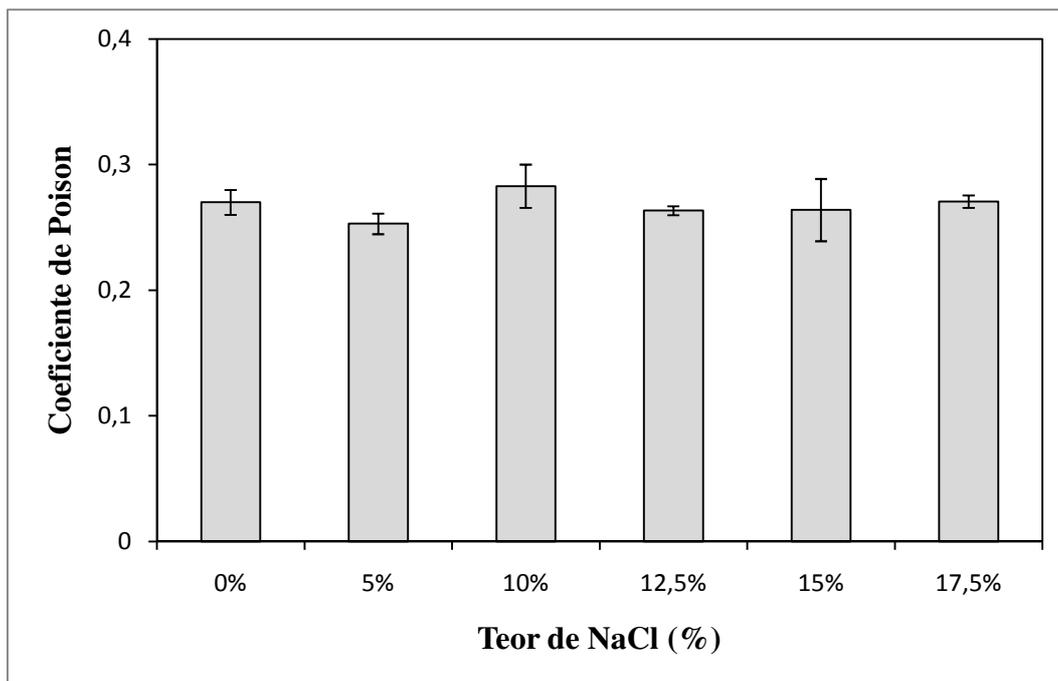


Gráfico 14. Variação do Coeficiente de Poisson para Pastas com NaCl.

O menor valor obtido para o coeficiente de Poisson foi de 0,25 para a pasta contendo 5% de NaCl, enquanto que o maior valor foi de 0,28 para a pasta contendo 10% deste sal.

Todos os resultados obtidos não foram significativamente diferentes ao nível considerado. Portanto, o cloreto de sódio não modificou o coeficiente de Poisson.

A Tabela 32 apresenta os valores do Coeficiente de Poisson (ν) para os ensaios realizados com a pasta de cloreto de potássio.

Tabela 32. Coeficiente de Poisson para Pastas com KCl.

Coeficiente de Poisson - ν					
% KCl	CP 01	CP 02	CP 03	Média	DP
0,00	0,27	0,26	0,27	0,27	0,01
2,50	0,00	0,00	0,00	0,24	0,01
5,00	0,22	0,23	0,23	0,23	0,01
7,50	0,24	0,23	0,23	0,23	0,01
10,00	0,25	0,24	0,19	0,23	0,03

O Gráfico 15 mostra a variação dos resultados para o coeficiente de Poisson para as pastas contendo KCl.

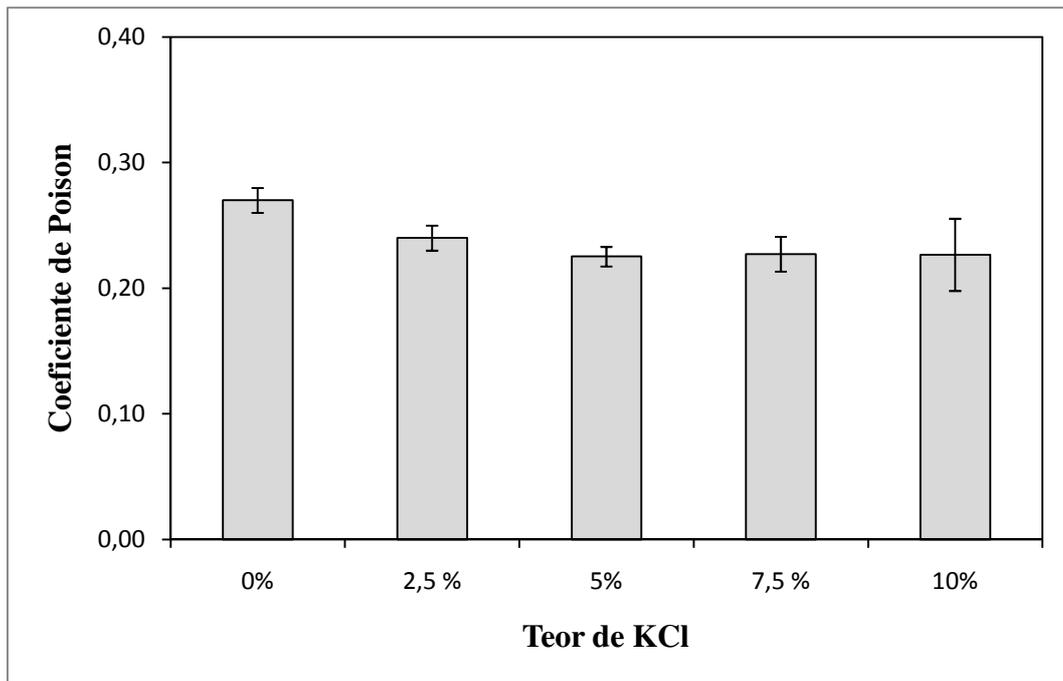


Gráfico 15. Variação do Coeficiente de Poisson para Pastas com KCl.

Todos as pastas salinas com KCl apresentaram coeficiente de Poisson inferior ao obtido para a pasta de referência. O menor valor obtido foi de 0,23 para as pastas contendo 5, 7,5 e 10% de KCl, enquanto que o maior valor foi de 0,27 para a pasta de referência.

As pastas salinas apresentaram queda de 14,8% em relação as pastas de referência.

O cloreto de sódio proporcionou queda no coeficiente de Poisson, uma vez que os valores são significativamente diferentes.

5.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração consiste nas forças trativas que o material poderá ser submetido sem que ocorra o rompimento do material. Na cimentação de poços direcionais, na zona curva, de ganho de ângulo do poço, a pasta, na região superior é submetida às forças compressivas e na região inferior é submetida às forças trativas.

A Tabela 33 mostra os valores para tração calculados obtidos a partir dos resultados dos ensaios realizados (Anexo I) para as pastas contendo NaCl. E o Gráfico 16 mostra a variação dos resultados obtidos para as pastas contendo NaCl.

Tabela 33. Tração para Pastas com NaCl .

Resistência à Tração por Compressão Diametral - (Mpa)							
% NaCl		CP 01	CP 02	CP 03	Média	Média Geral	DP
0,00	Topo	4,65	4,84	3,01	4,17		
	Meio	4,84	4,46	4,09	4,46	4,45	0,89
	Base	5,38	5,62	3,20	4,73		
5,00	Topo	3,09	3,59	3,60	3,34		
	Meio	3,30	4,73	3,70	3,91	3,78	0,66
	Base	2,97	4,44	4,83	4,08		
10,00	Topo	3,73	3,61	3,78	3,71		
	Meio	3,02	3,84	3,59	3,48	3,73	0,33
	Base	3,73	4,10	4,14	3,99		
12,50	Topo	4,61	3,85	3,71	4,06		
	Meio	3,90	2,97	3,43	3,43	3,68	0,62
	Base	3,78	2,61	4,29	3,56		
15,00	Topo	3,44	2,98	3,56	3,33		
	Meio	3,29	3,52	3,71	3,51	3,31	0,37
	Base	3,33	3,47	2,48	3,09		
17,50	Topo	3,92	3,76	5,04	4,24		
	Meio	3,02	3,72	3,22	3,32	3,57	0,75
	Base	3,41	3,75	2,28	3,15		

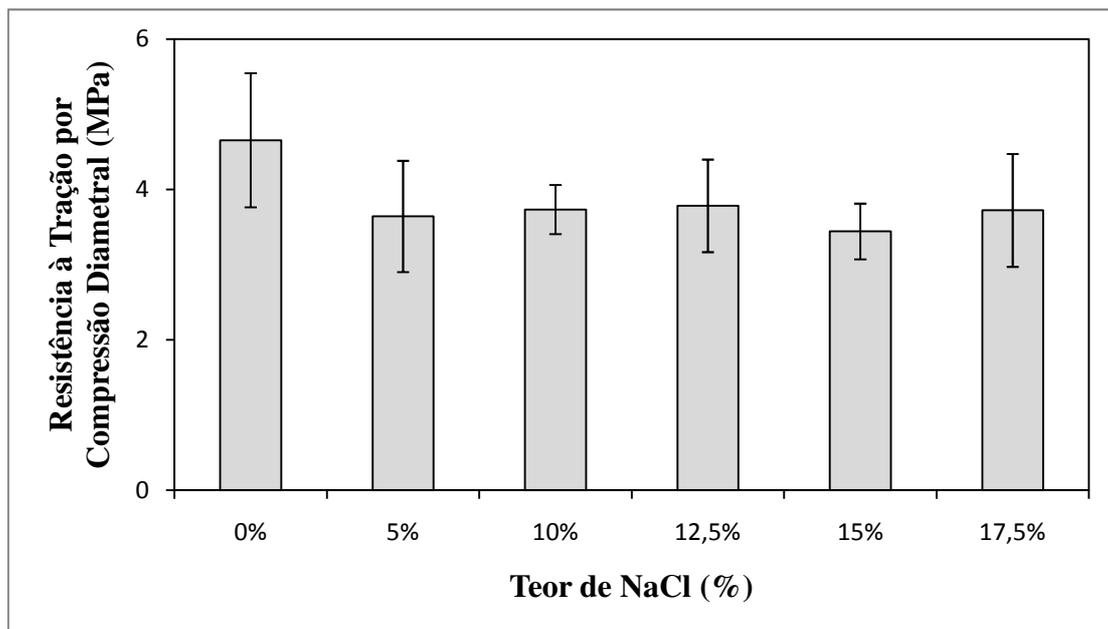


Gráfico 16. Variação da Resistência à Tração para Pastas com NaCl.

O maior valor obtido para resistência à tração foi de 4,45 MPa para a pasta de referência enquanto que o menor valor obtido foi de 3,31 MPa para a pasta contendo 15% de NaCl. Todas as pastas contendo NaCl testadas apresentaram resistência à tração inferior à obtida para a pasta de referência.

A pasta contendo 15% apresentou queda de 25,6% em relação a pasta de referência. A menor queda registrada foi de 15,06% para a pasta com 5% de NaCl. Além disso, somente este percentual apresentou valor estatisticamente diferente quando comparado com a pasta de referência. Desta forma, o acréscimo de NaCl proporcionou queda na resistência à tração, portanto, os valores obtidos ainda são aceitáveis.

A Tabela 34 mostra os valores para as pastas contendo KCl.

Tabela 34. Tração para Pastas com KCl.

Resistência à Tração por Compressão Diametral - (Mpa)							
% KCl		CP 01	CP 02	CP 03	Média	Média Geral	DP
0,00	Topo	4,65	4,84	3,01	4,17		
	Meio	4,84	4,46	4,09	4,46	4,45	0,89
	Base	5,38	5,62	3,20	4,73		
2,50	Topo	3,73	3,93	3,78	3,81		
	Meio	4,32	3,82	3,69	3,94	3,95	0,36
	Base	4,75	3,87	3,64	4,08		
5,00	Topo	4,77	3,03	5,18	4,33		
	Meio	4,23	4,33	4,50	4,35	4,54	1,04
	Base	3,61	6,74	4,46	4,94		
7,50	Topo	3,88	4,66	3,35	3,97		
	Meio	3,98	4,86	4,68	4,51	4,23	0,47
	Base	4,24	4,04	4,40	4,23		
10,00	Topo	4,00	3,97	4,17	4,05		
	Meio	3,65	5,09	4,41	4,38	4,08	0,47
	Base	4,04	3,45	3,93	3,81		

O Gráfico 17 mostra a variação dos resultados apresentados na Tabela 34.

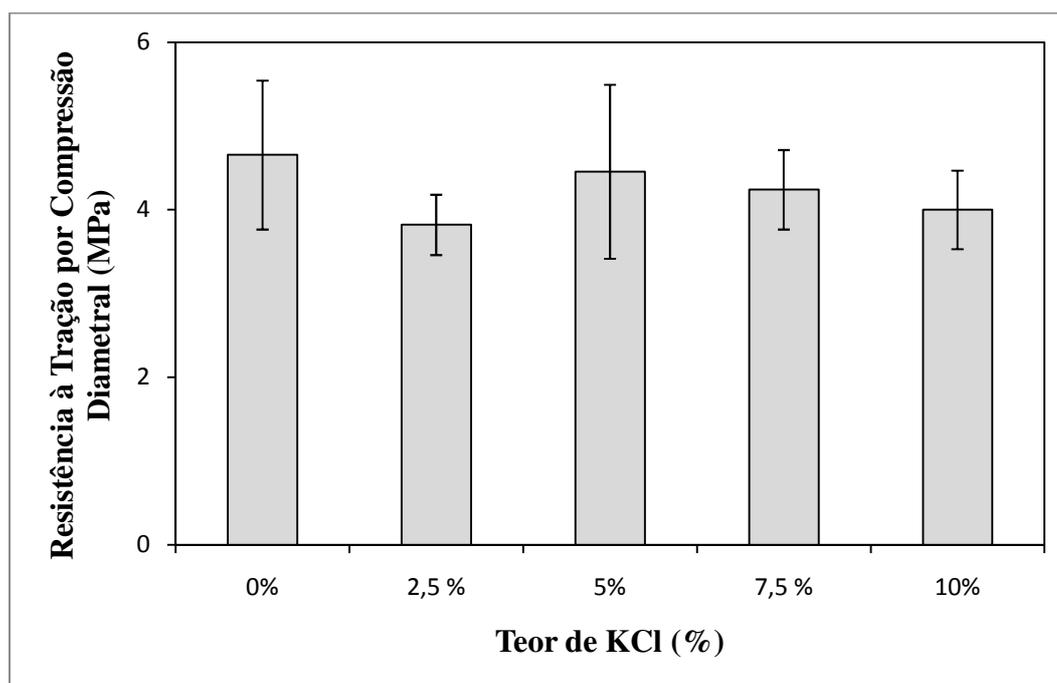


Gráfico 17. Variação da Resistência à Tração para Pastas com KCl.

Com exceção da pasta contendo 5% de KCl, todas as outras obtiveram valores de resistência à tração inferiores ao encontrado para a pasta de referência.

A pasta contendo 2,5% apresentou queda de 11,2% em relação a pasta de referência. Porém, a pasta contendo 5% de KCl apresentou aumento de 2%.

Nenhum valor apresentou resultado estatisticamente diferente quando comparado com a pasta de referência, portanto o acréscimo de KCl não proporciona mudança na resistência à tração.

6. CONCLUSÕES

Na elaboração de uma pasta para cimentação de uma fase de um determinado poço, são consideradas tantas quantas propriedades forem necessárias para minimizar os riscos de falhas na cimentação.

Comparando cada pasta salina com a pasta de referência, juntamente com a análise estatística, é possível fazer as seguintes afirmações:

As pastas com 5, 10 e 12,5% de NaCl possuem percentual de água livre menor que o da pastas de referência, enquanto que as pastas de 15 e 17,5% possuem percentuais acima. Porém somente a pasta com 10% de NaCl apresentou resultado estatisticamente diferente.

Todas as pastas com KCl testadas apresentaram teores de água livre inferiores ao teor da pastas de referência. Somente a pasta com 2,5% de KCl não apresentou resultado estatisticamente diferente.

Todas as pastas contendo NaCl testadas apresentaram queda na viscosidade plástica em relação à pasta de referência. Além disso, todos esses resultados são estatisticamente diferentes.

Todas as pastas contendo KCl testadas apresentaram queda na viscosidade plástica em relação à pasta de referência. Além disso, todos os resultados são estatisticamente diferentes.

A queda na viscosidade plástica representa uma alteração positiva nesta propriedade, pois o fluxo da pasta de cimento no anular do poço fica facilitado.

Todas as pastas contendo NaCl testadas apresentaram queda no limite de escoamento em relação à pasta de referência. Além disso, todos os resultados são estatisticamente diferentes.

As pastas com 2,5 e 5% de KCl apresentaram queda enquanto que para as pastas com mais de 5% de KCl os resultados obtidos mostram elevação no limite de escoamento. Somente o resultado obtido para a pasta com 7,5% de KCl não foi estatisticamente diferente.

O cloreto de sódio proporcionou queda no limite de escoamento, enquanto que o cloreto de potássio provocou queda em pequenas concentrações (2,5 e 5% de KCl). Porém, para valores elevados de KCl (10% de KCl) houve aumento nesta propriedade. A queda no limite de escoamento representa um efeito positivo, pois é necessária uma taxa de cisalhamento menor para que a pasta entre em movimento.

Todas as pastas contendo cloreto de sódio testadas apresentaram peso específico inferior ao peso específico encontrado para a pasta de referência. Os resultados para as pastas com 12,5, 15 e 17,5% são estatisticamente diferentes.

Todas as pastas contendo cloreto de potássio testadas apresentaram peso específico inferior ao peso específico encontrado para a pasta de referência. As pastas com 2,5 e 5% apresentaram resultados estatisticamente diferentes.

Porém, para ambos os sais, a diferença obtida nos resultados possivelmente se deve a diferença na quantidade de materiais nas formulações das pastas.

Todos os teores testados com pastas contendo cloreto de sódio apresentaram resistência à compressão inferior ao resultado encontrado para a pasta de referência. E todos os resultados são estatisticamente diferentes.

A pasta contendo 5% de KCl apresentou resistência à compressão superior ao resultado encontrado para a pasta de referência. Porém somente a pasta contendo 2,5% de KCl apresentou resultado estatisticamente diferente.

O acréscimo de ambos os sais na pasta de cimento proporcionou redução na resistência à compressão das pastas, porém, os valores encontrados ainda estão em níveis aceitáveis para sua utilização em cimentação de poços.

Todas as pastas contendo NaCl apresentaram módulo de elasticidade inferior ao resultado encontrado para a pasta de referência, sendo que a pasta com 10% deste sal não apresentou resultado estatisticamente diferente.

Todas as pastas contendo KCl apresentaram módulo de elasticidade inferior ao resultado encontrado para a pasta de referência. E todos os resultados são estatisticamente diferentes. Porém, a redução no módulo de elasticidade não invalidou as pastas salinas. Os resultados obtidos ainda são aceitáveis para a cimentação de poços.

Somente a pasta com 10% de NaCl apresentou coeficiente de Poisson superior ao da pasta de referência. Porém todos os resultados não são estatisticamente diferentes.

Todas as pastas contendo KCl apresentaram coeficiente de Poisson inferiores ao resultado encontrado para a pasta de referência. E todos os resultados são estatisticamente diferentes.

As pastas contendo NaCl apresentaram resistência à tração inferiores ao resultado encontrado para a pasta de referência. Porém somente a pasta contendo 15% de NaCl apresentou resultado estatisticamente diferente.

A pasta contendo 5% de KCl apresentou resistência à tração superior ao resultado encontrado para a pasta de referência. Porém, nenhum dos resultados são estatisticamente diferentes.

Apesar da queda obtida para a resistência à tração, os valores obtidos ainda são aceitáveis para a cimentação do poço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Andriolo, F.R.** “Construções de Concreto – Manual de Práticas para Controle e Execução”, São Paulo, Pini, 1984.
- American Petroleum Institute, API 10A, Specification for Cements and Materials for Well Cementing, 2002.
- BARTON, D. C. Mechanics of Formation of Salt Domes with Special Reference to Gulf Coast Salt Domes of Texas and Louisiana. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, Okla., v. 17, n. 9, p. 1025-1083, 1933.
- Barton, 1933; Nettleton, 1934; Weijermars *et al.*, 1993.
- CARVALHO, R. S. Sedimentação Evaporítica. In: **Seminário sobre “rifts” Intracontinentais**. Rio de Janeiro, PETROBRAS/DEPEX, 1987, p.52-57.
- FIGUEREIDO, A. M. F.; MOHRIAK, W. U., A Tectônica Salífera e as Acumulações de Petróleo na Bacia de Campos. In: CONGRESSO.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. Introduction to Fluid Mechanics. 2 ed. New York : J. wiley, 1978. 684 p.
- GONZAGA, F. G. **Simulação Geoquímica 1D ao Longo de uma seção Geológica da Bacia de Campos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 85 p.
- GUSSOW, W. C. Salt Diapirism: Importance of Temperature and Energy Source of Emplacement. 1968.
- HARDIE, L. A. Evaporites: Marine or Non-Marine? **American Journal of Science**, New Haven, Conn., v. 284, p. 193-240, 1984.
- HAYS, J. D.; PITTMAN III., W. C. Lithospheric Plate Motion, Sea-Level Changes and Climatic and Ecological Consequences. **Nature**, London, v; 246, p. 18-22, 1973.
- <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-imento/fabricacao/fabricacao>.
- HUBBERT, M. K. Mechanical Basis for Certain Familiar Geologic Structures. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 62, p. 355-372, 1951.
- JENYON, M. K. **Salt Tectonics**. London: Elsevier Applied Science, 1986.
- LERCHE, I.; O’BRIEN, J. J. (Ed.). **Dynamical Geology of Salt Related Structures**. Orlando, Fla. : Academic, 1987. 832 p. p. 419-455.

- MANN, P.; GAHAGAN, L.; GORDON, M. T. (Ed.). **Giant oil and Gas Fields of the Decade 1990-1999**. Tulsa, Okla. : American Association of Petroleum Geologists, 2003. P. 15-105.
- **Mehta, P.K.** “Concrete – Microstructure, Properties and Materials”, University of California at Berkeley, Third Edition, Estados Unidos.
- **MOHRIAK, W.; SZATMAN, P.; ANJOS, S. M. C.** “Sal: Geologia e Tectônica”. 1º Ed. São Paulo. Beca, 2008. 448 p.
- **Nelson, E.** “Well Cementing”, Schlumberger Educational Center, 1990.
- NETTLETON, L. L. Fluid Mechanics of Salt Domes. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, Okla., v. 18, p. 1175-1204, 1934.
- **Paris, J.M.F.** “Microscopia Del Clinker de Cimento Portland”, Instituto Eduardo Torroja, Espanha.
- **Petrucchi, E.G.** “Concreto de Cimento Portland”, ABCP, São Paulo, 1984.
- PITTMAN III., W. C. Relationship between eustacy and stratigraphic sequences of passive margins. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 89, n. 9, p. 1389-1403, Sept. 1978.
- RICHTER-BERNBURG, G. Paleogeographical Pre-conditions for the Genesis of Evaporites. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973. Aracajú. Sociedade Brasileira de Geologia, 1973. v. 2, p. 163-169.
- SCHALLER, H.; DAUZACKER, M. V. Tectônica Gravitacional e sua Aplicação na Exploração de Hidrocarbonetos. Boletim Técnico da PETROBRAS, Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, p. 193-206, 1986.
- SCHON, J. H. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Amsterdam: Elsevier, 1996. 583 p.
- SZATMARI, P. Evaporites and the Origin, Composition and Exploration of World oil Deposits. In: SIMPÓSIO DE ENERGIA DO HEMISFÉRIO OCIDENTAL, 2., 1980, Rio de Janeiro.
- SZATMARI, P. Evaporitos e a Geração de Hidrocarbonetos. **Ciências da Terra**, Salvador, n. 4, p. 21, 1982.
- TALBOT, C. J.; JARVIS, R. J. Age, Budget, and Dynamics of an Active Salt Extrusion in Iran. **Journal of Structural Geology**, Amsterdam, v. 6, p. 521-533, 1984.

- **THOMAS, J. E.** “Fundamentos da Engenharia de Petróleo”. 2º Ed. Rio de Janeiro. Interciência, 2001. 271 p.
- **WARREN, J. K. Evaporite Sedimentology: Importance in Hydrocarbon.** Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, 1989. 285 p.
- **WEIJERMARS, R.; JACKSON, M. P. A.; VENDEVILLE, B. C.** Rheological and Tectonic Modeling of Salt Provinces. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 217, p. 143-174, 1993.
- www.jisanta.com/Geologia.

Anexo I – Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Tabela 35 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, realizados para a pasta de cloreto de sódio.

Tabela 35. Resistência à Tração por Compressão Diametral para Pastas com NaCl.

Resistência à Tração por Compressão Diametral – Fc (KN)						
% NaCl		CP 01	CP 02	CP 03	Média	Média Geral
0%	Topo	9,17	9,62	5,92	8,24	
	Meio	9,55	8,77	8,15	8,82	4,65
	Base	10,65	10,9	6,37	9,31	
5%	Topo	6,17	7,17	x	6,67	
	Meio	6,7	9,57	7,52	7,93	3,64
	Base	6,02	8,92	9,67	8,20	
10%	Topo	7,37	7,02	7,6	7,33	
	Meio	6,1	7,67	7,17	6,98	3,73
	Base	7,55	8,17	8,15	7,96	
12,5%	Topo	9,07	7,72	7,22	8,00	
	Meio	7,5	5,92	6,89	6,77	3,78
	Base	7,17	5,12	8,56	6,95	
15%	Topo	6,92	6,12	7,32	6,79	
	Meio	6,77	7,2	7,62	7,20	3,44
	Base	6,82	7,1	5,12	6,35	
17,5%	Topo	7,92	7,57	10,02	8,50	
	Meio	6,07	7,47	6,45	6,66	3,72
	Base	6,82	7,45	4,55	6,27	

A Tabela 36 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, realizados para a pasta de cloreto de potássio.

Tabela 36. Resistência à Tração por Compressão Diametral para Pastas com KCl.

Resistência à Tração por Compressão Diametral – Fc (KN)						
% KCl		CP 01	CP 02	CP 03	Média	Média Geral
	Topo	9,17	9,62	5,92	8,24	
0%	Meio	9,55	8,77	8,15	8,82	4,65
	Base	10,65	10,9	6,37	9,31	
	Topo	7,57	7,87	7,62	7,69	
2,5 %	Meio	8,72	7,72	7,5	7,98	3,82
	Base	9,47	7,82	7,4	8,23	
	Topo	9,5	6,05	10,35	8,63	
5%	Meio	8,32	8,62	9,05	8,66	4,46
	Base	7,2	13,17	8,95	9,77	
	Topo	7,97	9,5	6,77	8,08	
7,5 %	Meio	8,17	9,77	9,55	9,16	4,24
	Base	8,82	8,2	8,72	8,58	
	Topo	8,02	7,85	8,32	8,06	
10%	Meio	7,27	10,3	8,74	8,77	4,00
	Base	8	6,95	7,87	7,61	

Anexo II – Dimensões dos Corpos de Prova para os Ensaios de Tração por Compressão Diametral

As Tabelas 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 e 46 mostram as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para cada uma das pastas.

Tabela 37. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta de Referência.

PASTA DE REFERÊNCIA							
	h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]	
T1	24,8	24,7	50,6	50,75	24,75	50,675	
CP1 M1	25,1	24,5	50,7	50,6	24,8	50,65	
B1	24,8	24,9	50,7	50,75	24,85	50,725	
T2	25,2	25,05	50,3	50,5	25,125	50,4	
CP2 M2	24,8	24,85	50,4	50,45	24,825	50,425	
B2	24,85	24,2	50,2	50,5	24,525	50,35	
T3	24,65	24,95	50,6	50,35	24,8	50,475	
CP3 M3	25,2	25,2	50,35	50,45	25,2	50,4	
B3	25,2	25,1	50,4	50,3	25,15	50,35	

Tabela 38. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 5% NaCl.

PASTA 5% NaCl							
	h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]	
T1	25,1	25,3	50,4	50,4	25,2	50,4	
CP1 M1	25,5	25,6	50,6	50,7	25,55	50,65	
B1	25,4	25,5	50,5	50,8	25,45	50,65	
T2	25,2	25,2	50,5	50,5	25,2	50,5	
CP2 M2	25,4	25,6	50,5	50,5	25,5	50,5	
B2	25,3	25,4	50,5	50,4	25,35	50,45	
T3	25,3	25,3	51	50,9	25,3	50,95	
CP3 M3	25,4	25,5	51	50,8	25,45	50,9	
B3	25	25	51	50,9	25	50,95	

Tabela 39. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 10% NaCl.

PASTA 10% NaCl							
		h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]
	T1	24,8	25	50,5	50,5	24,9	50,5
CP1	M1	25,3	25,3	50,8	50,8	25,3	50,8
	B1	25,4	25,5	50,6	50,6	25,45	50,6
	T2	23,8	25,3	50,4	50,4	24,55	50,4
CP2	M2	25,2	25,1	50,5	50,5	25,15	50,5
	B2	25,3	24,9	50,6	50,6	25,1	50,6
	T3	25,4	25,4	50,4	50,4	25,4	50,4
CP3	M3	25,7	24,9	50,3	50,3	25,3	50,3
	B3	24,1	25,4	50,6	50,6	24,75	50,6

Tabela 40. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 12,5% NaCl.

PASTA 12,5% NaCl							
		h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]
	T1	24,9	24,8	50,4	50,4	24,85	50,4
CP1	M1	24,6	23,9	50,5	50,5	24,25	50,5
	B1	23,8	23,9	50,6	50,6	23,85	50,6
	T2	25,1	25,4	50,5	50,5	25,25	50,5
CP2	M2	25,1	25,1	50,5	50,5	25,1	50,5
	B2	24,4	24,9	50,6	50,6	24,65	50,6
	T3	24,7	24,4	50,4	50,4	24,55	50,4
CP3	M3	25,3	25,4	50,5	50,5	25,35	50,5
	B3	25,1	25,2	50,5	50,5	25,15	50,5

Tabela 41. Dimensões dos Corpos de Prova – 15% NaCl.

PASTA 15% NaCl							
		h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]
	T1	25,3	25,4	50,5	50,5	25,35	50,5
CP1	M1	25,8	25,8	50,8	50,8	25,8	50,8
	B1	25,6	25,9	50,6	50,6	25,75	50,6
	T2	25,9	25,8	50,5	50,5	25,85	50,5
CP2	M2	25,8	25,6	50,7	50,6	25,7	50,65
	B2	25,7	25,7	50,7	50,75	25,7	50,725
	T3	26	25,9	50,3	50,5	25,95	50,4
CP3	M3	26	26	50,3	50,3	26	50,3
	B3	25,9	26	50,6	50,6	25,95	50,6

Tabela 42. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 17,5% NaCl.

PASTA 17,5% NaCl							
		h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]
	T1	25,5	25,4	50,5	50,5	25,45	50,5
CP1	M1	25,3	25	50,8	50,8	25,15	50,8
	B1	25,3	25	50,6	50,6	25,15	50,6
	T2	25,5	25,3	50,5	50,5	25,4	50,5
CP2	M2	25,3	25,4	50,4	50,4	25,35	50,4
	B2	25	25,1	50,5	50,5	25,05	50,5
	T3	25	25,2	50,3	50,5	25,1	50,4
CP3	M3	25,3	25,4	50,3	50,3	25,35	50,3
	B3	25,1	25,2	50,6	50,6	25,15	50,6

Tabela 43. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 2,5% KCl.

PASTA 2,5% KCl							
	h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]	
T1	25,9	25,4	50,4	50,35	25,65	50,375	
CP1 M1	25,4	25,6	50,35	50,45	25,5	50,4	
B1	25,3	25,1	50,4	50,4	25,2	50,4	
T2	25,3	25,4	50,3	50,3	25,35	50,3	
CP2 M2	25,1	25,9	50,45	50,45	25,5	50,45	
B2	25,5	25,5	50,5	50,45	25,5	50,475	
T3	25,8	25,1	50,4	50,35	25,45	50,375	
CP3 M3	25,6	25,8	50,4	50,4	25,7	50,4	
B3	25,9	25,5	50,35	50,4	25,7	50,375	

Tabela 44. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 5% KCl.

PASTA 5% KCl							
	h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]	
T1	25,2	25,3	50,2	50,2	25,25	50,2	
CP1 M1	25,02	24,9	50,2	50,2	24,96	50,2	
B1	25,3	25,3	50,2	50,2	25,3	50,2	
T2	25,3	25,3	50,4	50,2	25,3	50,3	
CP2 M2	25,2	25,2	50,2	50,4	25,2	50,3	
B2	24,8	24,6	50,4	50,3	24,7	50,35	
T3	25,4	25	50,6	50,4	25,2	50,5	
CP3 M3	25,3	25,5	50,4	50,4	25,4	50,4	
B3	25,4	25,3	50,4	50,5	25,35	50,45	

Tabela 45. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 7,5% KCl.

PASTA 7,5% KCl							
	h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]	
T1	25,9	25,9	50,4	50,5	25,9	50,45	
CP1 M1	25,4	26,3	50,3	50,8	25,85	50,55	
B1	26,1	26,3	50,3	50,8	26,2	50,55	
T2	25,4	25,8	50,6	50,8	25,6	50,7	
CP2 M2	24,8	25,7	50,8	50,6	25,25	50,7	
B2	25,4	25,6	50,6	50,8	25,5	50,7	
T3	25,3	25,4	50,7	50,7	25,35	50,7	
CP3 M3	25,5	25,7	50,7	50,7	25,6	50,7	
B3	24,5	25,1	50,9	50,9	24,8	50,9	

Tabela 46. Dimensões dos Corpos de Prova – Pasta 10% KCl.

PASTA 10% KCl							
	h_1 [mm]	h_2 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$h_{\text{médio}}$ [cm]	$d_{\text{médio}}$ [cm]	
T1	25,4	25,4	50,5	50	25,4	50,25	
CP1 M1	25	25,1	50,4	50,8	25,05	50,6	
B1	25,2	25	50,3	50,2	25,1	50,25	
T2	25	25,1	50,3	50,1	25,05	50,2	
CP2 M2	25,4	25,4	50,6	50,8	25,4	50,7	
B2	25,5	25,4	50,4	50,3	25,45	50,35	
T3	25,3	25	50,5	50,5	25,15	50,5	
CP3 M3	25	25,1	50,4	50,4	25,05	50,4	
B3	25,2	25,3	50,5	50,6	25,25	50,55	

Anexo III – Análise Estatística

A fim de comprovar as variações observadas nos ensaios, foi feita uma análise estatística dos resultados. A análise estatística foi feita no programa Origin 8 utilizando o teste de Turkey. Este teste realiza uma comparação entre as médias dizendo se são ou não estatisticamente diferentes. Para cada tipo de ensaio foram utilizadas três amostras de cada formulação.

A análise foi feita utilizando a metodologia “*one way ANOVA*” que consiste em uma análise de variância simples, cujo objetivo é comparar medidas de localização para mais do que dois grupos de observações. E, para analisar as diferenças na localização, recorre-se a uma análise das variâncias, dos vários grupos.

Quando esses grupos são bem modelados por distribuições normais de igual variância, se compara as médias entre os grupos. Como resultados da tabela *ANOVA* há o parâmetro F e o valor-p (*p-value*). O nível de significância considerado é de 0,05.

Quando o parâmetro F da tabela *ANOVA* for significativo, se utiliza o Teste de Turkey. Este teste consiste em uma ferramenta para comparação entre médias. É utilizado para testar todas as diferenças entre duas médias.

O Teste de Turkey tem como base a Diferença Mínima significativa (DMS), representada geralmente por Δ e é calculado através da Equação 8.

$$\Delta(\alpha) = q\alpha \sqrt{QMRe \frac{s}{r}}$$

Onde $q\Delta$ é valor da amplitude estudentizada, cujo o valor é encontrado em tabelas, em função do [número](#) de tratamentos e do número de grau de liberdade do resíduo, ao nível α de probabilidade (igual a 5%), s é a estimativa do desvio padrão residual (erro experimental) e r é o número de repetições.

Água Livre

A Tabela 47 apresenta os resultados da análise estatística realizada com os resultados dos ensaios de água livre para as pastas com NaCl.

Tabela 47. Análise Estatística para os Ensaios de Água Livre das Pastas com NaCl.

Água Livre - NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 0%NaCl	Não
12,5%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 0%NaCl	Não
15%NaCl 5%NaCl	Não
15%NaCl 10%NaCl	Sim
15%NaCl 12,5%NaCl	não
17,5%NaCl 0%NaCl	Não
17,5%NaCl 5%NaCl	Sim
17,5%NaCl 10%NaCl	Sim
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Sim
17,5%NaCl 15%NaCl	Não

A Tabela 48 apresenta os resultados da análise estatística realizada com os resultados dos ensaios de água livre para as pastas com KCl.

Tabela 48. Análise Estatística para os Ensaios de Água Livre das Pastas com KCl.

Água Livre – KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Não
5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 0%KCl	Sim
7,5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 5%KCl	Sim
10%KCl 0%KCl	Sim
10%KCl 2,5%KCl	Sim
10%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 7,5%KCl	Não

Reologia

A Tabela 49 apresenta os resultados da análise estatística realizada com os resultados obtidos para viscosidade plástica nos ensaios de reologia para as pastas com NaCl.

Tabela 49. Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (VP) das Pastas com NaCl.

Reologia VP NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 0%NaCl	Sim
12,5%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 0%NaCl	Sim
15%NaCl 5%NaCl	Não
15%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 0%NaCl	Sim
17,5%NaCl 5%NaCl	Não
17,5%NaCl 10%NaCl	Não
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 15%NaCl	Não

A Tabela 50 apresenta os resultados da análise estatística realizada com os resultados obtidos para viscosidade plástica nos ensaios de reologia para as pastas com KCl.

Tabela 50. Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (VP) das Pastas com KCl.

Reologia VP KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 0%KCl	Sim
7,5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 0%KCl	Sim
10%KCl 2,5%KCl	Sim
10%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 7,5%KCl	Não

A Tabela 51 apresenta os resultados da análise estatística realizada com os resultados obtidos para limite de escoamento nos ensaios de reologia para as pastas com NaCl.

Tabela 51. Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (LE) das Pastas com NaCl.

Reologia LE NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 5%NaCl	Sim
12,5%NaCl 0%NaCl	Sim
12,5%NaCl 5%NaCl	Sim
12,5%NaCl 10%NaCl	Sim
15%NaCl 0%NaCl	Sim
15%NaCl 5%NaCl	Sim
15%NaCl 10%NaCl	Sim
15%NaCl 12,5%NaCl	Sim
17,5%NaCl 0%NaCl	Sim
17,5%NaCl 5%NaCl	Sim
17,5%NaCl 10%NaCl	Sim
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Sim
17,5%NaCl 15%NaCl	Sim

A Tabela 52 apresenta os resultados da análise estatística realizada com os resultados obtidos para limite de escoamento nos ensaios de reologia para as pastas com KCl.

Tabela 52. Análise Estatística para os Ensaios de Reologia (LE) das Pastas com KCl.

Reologia LE KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 0%KCl	Não
7,5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 5%KCl	Sim
10%KCl 0%KCl	Sim
10%KCl 2,5%KCl	Sim
10%KCl 5%KCl	Sim
10%KCl 7,5%KCl	Sim

Peso Específico

A Tabela 53 apresenta os resultados obtidos na análise estatística realizada com os resultados obtidos nos ensaios para o peso específico das pastas contendo KCl.

Tabela 53. Análise Estatística para o Peso Específico das Pastas com NaCl.

Peso Específico NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 0%NaCl	Sim
12,5%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 0%NaCl	Sim
15%NaCl 5%NaCl	Não
15%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 0%NaCl	Sim
17,5%NaCl 5%NaCl	Não
17,5%NaCl 10%NaCl	Não
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 15%NaCl	Não

A Tabela 54 apresenta os resultados obtidos na análise estatística realizada com os resultados obtidos nos ensaios para o peso específico das pastas contendo KCl.

Tabela 54. Análise Estatística para o Peso Específico das Pastas com KCl.

Peso Específico KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 0%KCl	Não
7,5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 0%KCl	Não
10%KCl 2,5%KCl	Sim
10%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 7,5%KCl	Não

Resistência à Compressão Axial

A Tabela 55 mostra os resultados obtidos para a análise estatística realizada com os valores obtidos para resistência à compressão para as pastas com NaCl.

Tabela 55. Análise Estatística para a Força de Compressão das Pastas com NaCl.

Compressão Fc NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 0%NaCl	Sim
12,5%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 0%NaCl	Sim
15%NaCl 5%NaCl	Não
15%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 0%NaCl	Sim
17,5%NaCl 5%NaCl	Sim
17,5%NaCl 10%NaCl	Não
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 15%NaCl	Não

A Tabela 56 mostra os resultados obtidos para a análise estatística realizada com os valores obtidos para resistência à compressão para as pastas com KCl.

Tabela 56. Análise Estatística para a Força de Compressão das Pastas com KCl.

Compressão Fc KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 0%KCl	Não
5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 0%KCl	Não
7,5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 0%KCl	Não
10%KCl 2,5%KCl	Não
10%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 7,5%KCl	Não

A Tabela 57 mostra os resultados obtidos para a análise estatística feita com os valores obtidos para módulo de elasticidade para as pastas com NaCl.

Tabela 57. Análise Estatística para o Módulo de Elasticidade das Pastas com NaCl.

Compressão E NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Sim
10%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 0%NaCl	Sim
12,5%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 10%NaCl	Sim
15%NaCl 0%NaCl	Sim
15%NaCl 5%NaCl	Não
15%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 0%NaCl	Sim
17,5%NaCl 5%NaCl	Não
17,5%NaCl 10%NaCl	Não
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 15%NaCl	Não

A Tabela 58 mostra os resultados obtidos para a análise estatística feita com os valores obtidos para módulo de elasticidade para as pastas com KCl.

Tabela 58. Análise Estatística para o Módulo de Elasticidade das Pastas com KCl.

Compressão E KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 0%KCl	Sim
7,5%KCl 2,5%KCl	Sim
7,5%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 0%KCl	Sim
10%KCl 2,5%KCl	Sim
10%KCl 5%KCl	Sim
10%KCl 7,5%KCl	Não

A Tabela 59 apresenta os resultados obtidos para a análise estatística realizada com os valores obtidos para o coeficiente de Poisson para as pastas com NaCl.

Tabela 59. Análise Estatística para o Coeficiente de Poisson das Pastas com NaCl.

Compressão Poisson NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 0%NaCl	Não
12,5%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 0%NaCl	Não
15%NaCl 5%NaCl	Não
15%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 0%NaCl	Não
17,5%NaCl 5%NaCl	Não
17,5%NaCl 10%NaCl	Não
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 15%NaCl	Não

A Tabela 60 apresenta os resultados obtidos para a análise estatística realizada com os valores obtidos para o coeficiente de Poisson para as pastas com KCl.

Tabela 60. Análise Estatística para o Coeficiente de Poisson das Pastas com KCl.

Compressão Poisson KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 0%KCl	Sim
5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 0%KCl	Sim
7,5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 0%KCl	Sim
10%KCl 2,5%KCl	Não
10%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 7,5%KCl	Não

Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Tabela 61 mostra os resultados obtidos para a análise estatística realizada com os valores obtidos para tração para as pastas com NaCl.

Tabela 61. Análise Estatística para Tração Indireta para as Pastas com NaCl.

Tração Indireta NaCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
5%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 0%NaCl	Não
10%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 0%NaCl	Não
12,5%NaCl 5%NaCl	Não
12,5%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 0%NaCl	Sim
15%NaCl 5%NaCl	Não
15%NaCl 10%NaCl	Não
15%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 0%NaCl	Não
17,5%NaCl 5%NaCl	Não
17,5%NaCl 10%NaCl	Não
17,5%NaCl 12,5%NaCl	Não
17,5%NaCl 15%NaCl	Não

A Tabela 62 mostra os resultados obtidos para a análise estatística realizada com os valores obtidos para tração para as pastas com KCl.

Tabela 62. Análise Estatística para Tração Indireta para as Pastas com KCl.

Tração Indireta KCl	
Pastas Comparadas	Estatisticamente Diferente
2,5%KCl 0%KCl	Não
5%KCl 0%KCl	Não
5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 0%KCl	Não
7,5%KCl 2,5%KCl	Não
7,5%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 0%KCl	Não
10%KCl 2,5%KCl	Não
10%KCl 5%KCl	Não
10%KCl 7,5%KCl	Não