

**UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO

**ESTUDO DA DISSOLUÇÃO DE PARTÍCULAS DE NaCl
EM FLUIDO DE PERFURAÇÃO BASE AQUOSA
VISCOSIFICADO COM BENTONITA**

RENATA VIEIRA DE CARVALHO

2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA DISSOLUÇÃO DE PARTÍCULAS DE NaCl EM FLUIDO
DE PERFURAÇÃO BASE AQUOSA VISCOSIFICADO COM
BENTONITA**

RENATA VIEIRA DE CARVALHO

Sob a Orientação de
Cláudia Míriam Scheid
e Coorientação de
Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito
para obtenção do grau de **Mestre em**
Ciências em Engenharia Química, área
de concentração em tecnologia química.

Seropédica, RJ
Agosto de 2017

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C331e Carvalho, Renata Vieira, 1990-
Estudo da dissolução de partículas de NaCl em fluido
de perfuração base aquosa viscosificado com bentonita
/ Renata Vieira Carvalho. - 2017.
104 f.: il.

Orientadora: Cláudia Míriam Scheid.
Coorientador: Luís Américo Calçada.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Engenharia Química, 2017.

1. fluido de perfuração. 2. pré-sal. 3. bentonita.
4. reologia. 5. cinética de dissolução. I. Scheid,
Cláudia Míriam, 1968-, orient. II. Calçada, Luís
Américo, 1966-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Engenharia Química. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

RENATA VIEIRA DE CARVALHO

Dissertação submetida como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no curso de pós-graduação em Engenharia Química, área de concentração em tecnologia química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/08/2017

Cláudia Míriam Scheid, D. Sc., DEQ/UFRRJ
orientador

Ricardo Pires Peçanha, Ph. D., EQ/UFRRJ

Alex da Silva Sirqueira, D.Sc., UEZO

“Quanto melhor é adquirir a sabedoria do que o ouro! E quanto mais excelente,
adquirir a prudência do que a prata”. Provérbios 16:16

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por me permitir chegar até aqui, sou a prova de que “Deus não escolhe os capacitado capacita os escolhidos”. Nos momentos mais difíceis Deus é o meu refúgio e a minha fortaleza.

Agradeço aos meus pais Ulisses e Lourdes, pois sem o apoio deles não seria possível, reconheço a dedicação semana após semana colocando em primeiro lugar os meus estudos e minha evolução, se hoje alcanço essa vitória é graças principalmente a vocês, obrigada por todas as coisas que fizeram ao longo do mestrado e da vida.

Agradeço aos demais familiares que torceram pelo meu sucesso e por ter tido o incentivo de cada um. A minha irmã, por ter vibrado e me parabenizado em cada etapa, sem dúvidas foi de extrema importância. Ao meu namorado Everton por segurar a barra comigo em todos os momentos, me ajudando principalmente em oração, por sempre me incentivar e me dizer que eu sou capaz, eu amo todos vocês.

Agradeço a minha orientadora professora Cláudia Miriam Scheid que sempre esteve presente a me ajudar, me incentivar e acima de tudo a me ensinar, por possuir qualidades únicas e de extrema importância que são a humildade e respeito pelo próximo.

Ao Coorientador professor Luís Américo Calçada por ter dado apoio na parte de simulação e por ter dado excelentes sugestões para evolução do trabalho durante os seminários.

A professora Renata Nunes de Oliveira que foi de grande importância para melhoria do trabalho e para entender alguns resultados obtidos durante os experimentos.

Agradeço a aluna de iniciação científica Beatriz Rosas que foi quem me impulsionou e me mostrou com muita dedicação o que é trabalhar em equipe, que me ensinou tantas coisas e estou certa que sem ela não teria ficado como ficou.

Agradeço a todos os alunos e colaboradores do LEF que nunca negaram ajuda quando precisei, aos amigos que conquistei durante as disciplinas e durante os testes em laboratório, aos técnicos dos laboratórios de química, floresta que me auxiliaram na realização de testes.

Ao CENPES, Laboratório de Catálise e Laboratório de Floresta, que possibilitaram a realização de testes de extrema importância.

Dedico este trabalho aos meus pais Ulisses e Lourdes, a minha irmã Amanda, ao meu namorado Everton e a todos que acreditaram em mim.

RESUMO

CARVALHO, Renata Vieira. **Estudo da dissolução de partículas de NaCl em fluido de perfuração base aquosa viscosificado com bentonita** 2017. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

A perfuração de poços de petróleo em camadas salinas ganham visibilidade ao longo dos anos e estudos são realizados com o objetivo de aperfeiçoar as técnicas para este cenário. A dissolução das camadas salinas influencia diretamente as propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração, sendo necessárias formulações previamente planejadas para cada tipo de poço. Neste trabalho, busca-se avaliar a dissolução de partículas de NaCl e a influência que esse tipo de eletrólito provoca nas propriedades físico-químicas dos fluidos viscosificados com bentonita. Para tal, testes de caracterização, reologia e experimentos de dissolução de cloreto de sódio foram realizados em diferentes concentrações de bentonita e sal. Os testes de caracterização da bentonita foram difratometria de raios X, análise granulométrica, microscopia eletrônica de varredura e testes de inchamento. No estudo de reologia das suspensões, foram realizados testes para avaliar o efeito do tempo e das concentrações de sal e bentonita sobre a viscosidade aparente da suspensão. Para os testes de cinética, utilizou-se uma unidade experimental que simula um tanque de mistura perfeita com volume de 1L. A medida da condutividade foi o método utilizado para avaliar como ocorre a dissolução de NaCl ao longo do tempo. Utilizou-se ainda um modelo matemático para estimar o coeficiente global de transferência de massa do processo de dissolução. Os resultados de concentração de sal dissolvido obtidos experimentalmente foram comparados com os fornecidos pelo modelo. Os desvios entre a concentração experimental e a calculada pelo modelo foram inferiores a 10%. Os teste reológicos apontaram que a medida que ocorre acréscimo da bentonita no fluido, a viscosidade aparente sofre conseqüente aumento. Verificou-se também que a adição de sal ao fluido de perfuração ocasiona a redução da viscosidade aparente. Comportamento inverso ocorre para altas concentrações sal, onde a viscosidade aparente eleva-se. Associa-se os comportamentos com a adição de sal, a compressão e descompressão da dupla camada difusa.

Palavras-chave: fluidos de perfuração, pré-sal, bentonita, reologia, cinética de dissolução.

ABSTRACT

CARVALHO, Renata Vieira. Study of the dissolution of NaCl particles in aqueous base drilling viscosified with bentonite 2017. 84 p. Dissertation (Master in Chemical Engineering, Chemical Technology). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

The drilling of oil wells in salt layers has been improved over the years and studies on the subject are carried out with the aim of perfecting the used techniques. The dissolution of the saline layers influenced as a physical-chemical well of the drilling fluids, with previously planned formulations required for each type of well. In this work, we intend to evaluate a dissolution of NaCl particles and an influence that this type of electrolyte causes on the chemical chemical properties of the fluids viscous with bentonite. For this purpose, characterization tests, rheology and sodium chloride dissolution experiments were carried out at different concentrations of bentonite and salt. The bentonite characterization tests were X-ray diffractometry, particle size analysis, scanning electron microscopy and pulse testicles. In the rheology study of the suspensions, tests were performed to evaluate the effect of time and the concentrations of salt and bentonite on the apparent viscosity of the suspension. For kinetic tests, an experimental unit that simulates a perfect mixing tank with volume of 1L is used. The measurement of the conductivity for the method used to evaluate how a NaCl dissolution occurs over time. The mathematical model was also used to estimate the mass transfer coefficient of the dissolution process. The results of dissolved salt concentration obtained experimentally were compared with those provided by the model. The deviations between an experimental concentration and a calculator by the model were less than 10%. The rheological test pointed out that as the bentonite increases without fluid, an apparent viscosity increases accordingly. It has also been found that an addition of salt to the drilling fluid and an apparent viscosity reduction. Reverse behavior for high salt concentrations, where an apparent viscosity rises. The behaviors are associated with a salt addition a compression and decompression of the diffuse double layer.

Keywords: drilling fluids, pre-salt, bentonite, rheology, dissolution kinetics.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II.....	3
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 O Petróleo	3
2.2 A Perfuração	4
2.2.1 Perfuração em camadas salinas	4
2.2.2 Exploração no Brasil	5
2.2.3 Identificação da presença de sal durante a perfuração	5
2.3 Os Fluidos de Perfuração	6
2.3.1 As características dos fluidos de perfuração	6
2.3.2 As classificações dos fluidos de perfuração	7
2.3.3 As propriedades dos fluidos de perfuração	7
2.3.4 Os principais aditivos dos fluidos de perfuração	7
2.4 Reologia	8
2.4.1 Tipos de fluidos	8
2.5 Argila Bentonítica.....	10
2.5.1 Composição das argilas	12
2.5.2 Sistemas coloidais	13
2.6 Dissolução de Sais	14
2.6.1 Coeficiente convectivo de transferência de massa.....	14
2.6.2 Cinética de dissolução de sais	15
CAPÍTULO III.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Planejamento Experimental	21
3.2 Caracterização dos Materiais	22
3.2.1 Picnometria.....	22
3.2.2 Difractometria de raios X.....	22
3.2.3 Quarteamento do sal.....	23
3.2.4 Análise granulométrica dos sólidos.....	24
3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura	24
3.2.6 Área superficial específica	24
3.2.7 Teste de inchamento.....	25

3.2.8	Balança de lama	25
3.2.9	Agitador Hamilton.....	26
3.3	Reologia	26
3.4	Cinética de Dissolução.....	28
3.5	Abordagem Matemática.....	31
3.6	Variáveis do processo	33
CAPÍTULO IV		35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Densidades	35
4.2	Difração de Raios X.....	35
4.3	Análise Granulométrica	35
4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura	36
4.5	Teste de inchamento	37
4.6	Área Superficial Específica	38
4.7	Experimentos Reológicos	38
4.7.1	Efeito do tempo para fluidos com a ausência de sal	38
4.7.2	Efeito do tempo na reologia para fluidos com a presença de sal	40
4.7.3	Comparação do efeito da concentração de bentonita na reologia	44
4.7.4	Efeito da concentração de sal	46
4.8	Experimentos de cinética	48
4.8.1	Perfis de concentração <i>versus</i> tempo	49
4.8.2	Coeficiente de transferência de massa	52
4.8.3	Simulações	55
CAPÍTULO V.....		64
5	CONCLUSÕES.....	64
CAPÍTULO VI		66
6	SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS.....	66
CAPÍTULO VII.....		67
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
ANEXO – Resultados complementares.....		72

INDÍCES DE FIGURAS

Figura 1. Camadas nos campos do pré-sal. Fonte: Petrobras (2017).....	1
Figura 2. Geração, migração, acumulação e aprisionamento de petróleo em rochas sedimentares.	3
Figura 3. Camadas geológicas para compreensão da localização do pré-sal. Fonte: Diário do pré-sal (2016).	5
Figura 4. Circulação do fluido de perfuração. Fonte: Rigzone (2017).	6
Figura 5. Curvas de escoamento de fluido newtoniano e fluido não-newtoniano. Fonte: adaptado de Machado (2002).	8
Figura 6. Curvas de fluidos tixotrópicos e reopéticos. Fonte: Skelland (1967).	10
Figura 7. Adsorção de moléculas de água na superfície da argila. Fonte: Nelson (2017).	11
Figura 8. Distância entre as lamelas e agregação em forma de cartas de baralho. Fonte: adaptado de Pereira (2001).	12
Figura 9. Ligação entre as duas folhas tetraédricas e uma octaédrica por meio de átomos de oxigênio compartilhados. Fonte: Darley e Gray, 1988.	12
Figura 10. Ilustração da dupla camada difusa. Fonte: Castellan (1998).	13
Figura 11. Fluxo de transporte de solutos. Fonte: adaptado de Incropera <i>et al.</i> (2007).	14
Figura 12. Célula de dissolução. Fonte: Simon (1981).	15
Figura 13. Aparato experimental para determinação do coeficiente de transferência de massa para partículas em fluxo líquido. Fonte: Aksel'rud <i>et al.</i> (1992).	16
Figura 14. Comparação entre a concentração obtida experimentalmente e dada pela simulação. Fonte: Patrão (2012).	18
Figura 15. K em função da concentração da fase líquida. Fonte: Martins (2014).	18
Figura 16. Concentração experimental versus calculada para unidade de escoamento. Fonte: Magalhães <i>et al.</i> (2014).	19
Figura 17. Perfis de concentração experimental e ajustado para o experimento com 1 lb/bbl de goma xantana e 98g/L de sal. Fonte: Meneses (2016).	19
Figura 18. Fluxograma da estrutura do trabalho.	20
Figura 19. Correlação das combinações das concentrações de bentonita com as concentrações de sal.	21
Figura 20. Picnômetro. Fonte: Pró-análise (2016).	22
Figura 21. Difrátômetro de raios X. Fonte: Rigaku (2016).	23
Figura 22. Amostras subdivididas de sal pela técnica de pilha cônica.	23
Figura 23. Amostra final do sal homogeneizado.	23
Figura 24. Analisador de partículas com difração a laser. Fonte: Malvern (2016).	24
Figura 25. Equipamento MEV da Hitach-TM 3000.	24
Figura 26. M4600 célula de compressão. Fonte: Manual Grace instruments.	25
Figura 27. M4600 HPHT LSM (Linear Swell Meter) - Medidor de inchamento. Fonte: Manual Grace instruments.	25
Figura 28. FANN Balança de Lama. Fonte: Eurosul (2016).	26
Figura 29. Agitador Hamilton Beach. Fonte: Eurosul (2016).	26
Figura 30. Reômetro Haake RheoStress 1 - Thermo Scientific. Fonte: Thermo Fisher (2016).	27
Figura 31. Foto da geometria de cilindros coaxiais.	27
Figura 32. Foto do banho de água utilizado para controlar a temperatura.	28
Figura 33: Esquema das medidas adotadas para o aparato experimental.	28

Figura 34. Béquer utilizado como sistema de mistura.....	29
Figura 35. Misturador Fisatom. Fonte: Fisatom (2016).	29
Figura 36. Banho de água. Fonte: Brookfield (2016).	29
Figura 37. Medidor de condutividade S230 SevenCompactTM. Fonte: Mettler Toledo (2016).	29
Figura 38. Unidade utilizada para realização dos testes de cinética de dissolução de sal.....	30
Figura 39. Esquema da unidade utilizada para realização dos testes de cinética de dissolução de sal.....	30
Figura 40. Curva de calibração para concentração de bentonita de 10 lb/bbl.	31
Figura 41. Difratoograma de Raios X.....	35
Figura 42: Análise granulométrica do sal.....	36
Figura 43: Análise granulométrica da bentonita.....	36
Figura 44. Micrografia obtida a partir a) ampliação 100x, b) ampliação 800x, c) e d) ampliação 1500x da bentonita.	37
Figura 45. Teste de inchamento.....	37
Figura 46. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), fluido com 10 lb/bbl de bentonita.	38
Figura 47. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), fluido com 15 lb/bbl de bentonita.	39
Figura 48. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), fluido com 20 lb/bbl de bentonita.	39
Figura 49. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 10 lb/bbl de bentonita com 32 g/L de sal.....	40
Figura 50. Avaliação do efeito do tempo na reologia, , tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 10 lb/bbl de bentonita com 96 g/L de sal.....	40
Figura 51. Avaliação do efeito do tempo na reologia, , tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 10 lb/bbl de bentonita com 180 g/L de sal.....	41
Figura 52. Avaliação do efeito do tempo na reologia, , tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 15 lb/bbl de bentonita com 32 g/L de sal.....	41
Figura 53. Avaliação do efeito do tempo na reologia, , tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 15 lb/bbl de bentonita com 96 g/L de sal.....	42
Figura 54. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 15 lb/bbl de bentonita e 180 g/L de sal.....	42
Figura 55: Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 20 lb/bbl de bentonita com 32 g/L de sal.....	43
Figura 56. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 20 lb/bbl de bentonita com 96 g/L de sal.....	43

Figura 57: Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões de 20 lb/bbl de bentonita com 180 g/L de sal.....	43
Figura 58. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), com 0 g/L de sal.	44
Figura 59. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), com 32 g/L de sal.....	45
Figura 60. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), com 96 g/L de sal.....	45
Figura 61. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), com 180 g/L de sal.....	45
Figura 62. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões com 10 lb/bbl de bentonita e diferentes concentrações de NaCl.	46
Figura 63. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita.	47
Figura 64. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação (a), viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação (b), para suspensões com 20 lb/bbl de bentonita.	47
Figura 65. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, fixando a concentração inicial de sal em 32 g/L.....	49
Figura 66. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, fixando a concentração inicial de sal em 96 g/L.....	49
Figura 67. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, fixando a concentração inicial de sal em 180 g/L.....	50
Figura 68. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, para concentração inicial de bentonita de 10 lb/bbl.	51
Figura 69. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, para concentração inicial de bentonita de 15 lb/bbl.	51
Figura 70. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, para concentração inicial de bentonita de 20 lb/bbl.	52
Figura 71. Distribuição do coeficiente de transferência de massa em função da concentração de bentonita e da concentração inicial de NaCl no fluido.	54
Figura 72. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, para concentração inicial de bentonita em 10 lb/bbl com os dados experimentais e do modelo.	55
Figura 73. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, para concentração inicial de bentonita em 15 lb/bbl com os dados experimentais e do modelo.	56
Figura 74. Perfis de concentração <i>versus</i> tempo, para concentração inicial de bentonita em 20 lb/bbl com os dados experimentais e do modelo.	56
Figura 75. Concentração do modelo <i>versus</i> concentração experimental.....	57
Figura 76. Perfis de fração volumétrica <i>versus</i> tempo para experimentos com 10 lb/bbl.....	58
Figura 77. Perfis de fração volumétrica <i>versus</i> tempo para experimentos com 15 lb/bbl.....	58

Figura 78. Perfis de fração volumétrica <i>versus</i> tempo para experimentos com 20 lb/bbl.....	59
Figura 79. Perfis de fração volumétrica <i>versus</i> tempo para experimentos com 32 g/L de sal.....	59
Figura 80. Perfis de fração volumétrica <i>versus</i> tempo para experimentos com 96 g/L de sal.....	60
Figura 81. Perfis de fração volumétrica <i>versus</i> tempo para experimentos com 180 g/L de sal.....	60
Figura 82. Perfis de diâmetro médio <i>versus</i> tempo para fluido com 10 lb/bbl de bentonita.....	61
Figura 83. Perfis de diâmetro médio <i>versus</i> tempo para fluido com 15 lb/bbl de bentonita.....	61
Figura 84. Perfis de diâmetro médio <i>versus</i> tempo para fluido com 20 lb/bbl de bentonita.....	62
Figura 85. Perfis de diâmetro médio <i>versus</i> tempo para fluido com 32 g/L de sal.	62
Figura 86. Perfis de diâmetro médio <i>versus</i> tempo para fluido com 96 g/L de sal.	63
Figura 87. Perfis de diâmetro médio <i>versus</i> tempo para fluido com 180 g/L.	63
Figura 88. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 1.	72
Figura 89. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal - Dia 3.	72
Figura 90. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 4.	73
Figura 91. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 5.	73
Figura 92. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 6.	73
Figura 93. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 1.	74
Figura 94. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 3.	74
Figura 95. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 4.	74
Figura 96. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 5.	75
Figura 97. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 6.	75
Figura 98. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 96 g/L de sal. - Dia 1.	75

Figura 115. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 3.	81
Figura 116. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 4.	81
Figura 117. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 5.	82
Figura 118. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 6.	82
Figura 119. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 1.	82
Figura 120. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 3.	83
Figura 121. Efeito da concentração de sal a reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 4.	83
Figura 122. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 20 lb/bbl de bentonita. - Dia 5.	83
Figura 123. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação e viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação para suspensões com 20 lb/bbl de bentonita. - Dia 6.	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens do fluido de perfuração à base de água. Fonte: adaptado de Guimarães e Rossi (2007).	7
Tabela 2. Aditivos de fluidos de perfuração e suas funções. Fonte: adaptado de Rocha <i>et al.</i> (2011).	8
Tabela 3. Taxa de dissolução de NaCl e KCl (cm/s) x 10 ³ em água pura para diferentes temperaturas. Fonte: adaptado de Simon (1981).	15
Tabela 4. Valores dos coeficientes de transferência de massa. Fonte: Aksel'rud <i>et al.</i> (1992).	16
Tabela 5. Planejamento experimental 3 ² totalizando 9 experimentos.	21
Tabela 6: Formulação das suspensões de bentonita	27
Tabela 7. Variáveis utilizadas no modelo.	34
Tabela 8: Resultados das triplicatas dos fluidos preparados com 10 lb/bbl de bentonita e 32 g/L de sal.	48
Tabela 9: Valores estimados para os coeficientes de transferência de massa.	52
Tabela 10. Comparação dos valores dos coeficientes de transferência de massa.	53

NOMENCLATURA

a	Área interfacial de transferência de massa de partículas de sal (m^{-1})
A	Área total de transferência de massa (Equação 7) (m^2)
A_p	Área superficial para população de sólidos (Equação 10) (m^2)
C	Concentração instantânea de cloreto de sódio na solução (kg/m^3)
C	Concentração da solução (g/cm^3) (Equação 6)
C_A	Concentração do soluto A (kg/m^3)
$C_{A\infty}$	Concentração do soluto A no meio líquido (kg/m^3)
C_{Bent}	Concentração de bentonita no fluido (lb/bbl)
C_0	Concentração inicial de NaCl no fluido (kg/m^3)
C_s	Concentração de saturação (g/cm^3) (Equação 6)
C_{sat}	Concentração de saturação da halita (kg/m^3) (Equação 8)
C^*	Concentração de saturação de NaCl no fluido (kg/m^3)
C^*	Concentração instantânea da halita (kg/m^3) (Equação 8)
D	Diâmetro do impelidor (cm)
\bar{D}_p	Diâmetro médio de Sauter (m)
d_p	Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula
D_{AB}	Coefficiente de difusão (m^2/s)
K	Coefficiente convectivo de transferência de massa (m/s)
K_t	Coefficiente de transferência de massa (m/s) (Equações 8 e 9)
K_0	Coefficiente de transferência de massa (cm/s) (Equação 6)
lb/bbl	Medida de concentração libras/barril
m_p	Massa total da população de partículas (kg)
m_{Cl^-}	Massa de Cl^- (kg)
m_{Na^+}	Massa de Na^+ (kg)
m_{sal}	Massa de sal (kg)
N	Número de rotação do impelidor (RPM)
$NaCl$	Cloreto de sódio
$N_{A,z}$	Fluxo do soluto A na direção z (mol/m^2s)
N_p	Número de partículas da população
Re_{tq}	Número de Reynolds para tanque agitado
RPM	Medida de rotação/ minuto
t	Tempo (s)
T	Temperatura (K)
V	Volume da solução (m^3)
V	Taxa superficial de dissolução (cm/s) (Equação 6)
API	<i>American Petroleum Institute</i>
$^{\circ}C$	Grau Celsius
LEF	Laboratório de Escoamento de Fluidos

Letras gregas

β	Parâmetro da formato da hélice
γ	Taxa de deformação (s^{-1})
δ	Coefficiente de camada limite
ε_s	Fração volumétrica de partícula de sal
ε_{s0}	Fração volumétrica inicial de partículas de sal
θ	Deflexão angular

μ	Viscosidade dinâmica (cP)
μ_a	Viscosidade aparente (cP)
μm	Medida de distância micrômetro
ρ	Densidade (g/L)
ρ_f	Massa específica do fluido (g/L)
τ	Tensão de cisalhamento (Pa)
\emptyset	Esfericidade da partícula
Å	Medida em angstrom

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, poços cada vez mais profundos foram descobertos chegando à camada do pré-sal formada por depósitos de sais acumulados entre camadas de materiais orgânicos como mostra a Figura 1. A presença destes materiais orgânicos propicia a produção de petróleo quando expostos a condições ambientais favoráveis.

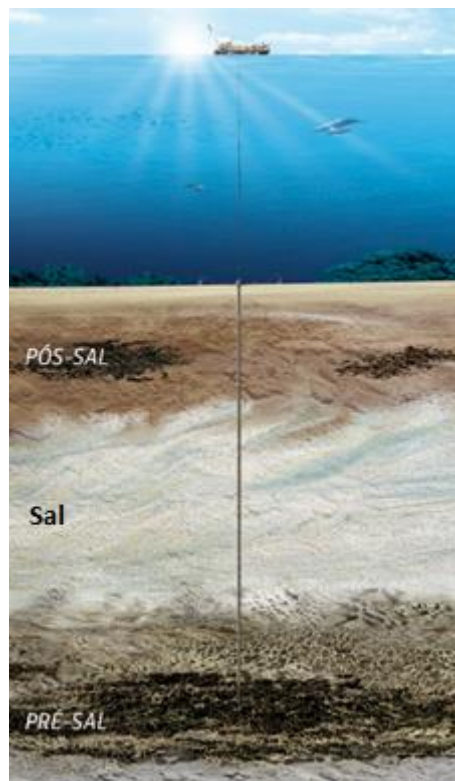


Figura 1. Camadas nos campos do pré-sal. Fonte: Petrobras (2017).

A perfuração de camadas salinas requer estudos e tecnologias avançadas, uma vez que durante a ação da broca de perfuração cascalhos são retirados das paredes trazendo com eles partículas de sal. Essas partículas de sal em contato com fluido de perfuração a base de água se dissolvem e modificam as propriedades físico-químicas dos fluidos, podendo causar prejuízos na perfuração ou até mesmo a perda do poço, o que não é desejável devido ao alto custo para perfuração de um poço de petróleo.

A formulação adequada de um fluido de perfuração se faz necessária para garantir que as propriedades não se alterarão e que os cascalhos formados permanecerão suspensos no transporte até a superfície.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo dos efeitos da dissolução de partículas de NaCl em fluidos de perfuração a base de água viscosificados com bentonita através de experimentos e simulação, dando continuidade a uma linha de pesquisa do Laboratório de Escoamento de Fluidos. Esta linha traz como abordagem o estudo da dissolução de sais em salmoura (MAGALHÃES *et al.*, 2011, 2014; PATRÃO, 2012; MARTINS, 2014) e mais recentemente a dissolução de NaCl em fluidos não-newtonianos viscosificados com goma

xantana (MENESES, 2016). A partir dos estudos cinéticos anteriores, desenvolveu-se um modelo da dissolução de partículas de sal que foi sendo aprimorado ao longo dos anos e que será utilizado neste trabalho para avaliação da cinética da dissolução do NaCl em fluidos viscosificados com bentonita.

A seleção da bentonita como viscosificante é justificável, visto que, a bentonita é amplamente utilizada em fluidos de perfuração e possui propriedades reológicas que são essenciais para perfuração.

Nessa linha de conhecimento, é possível encontrar trabalhos que abordem o estudo do comportamento reológico do fluido de perfuração preparado com bentonita, água e sal, porém tratando-se das questões de cinética de dissolução e modelagem matemática, apenas trabalhos que estudam fluidos a base de água, sal e viscosificante como goma xantana e carboximetilcelulose foram encontrados (AKSEL'RUD *et al.*, 1992; MAGALHÃES *et al.*, 2011, 2014; PATRÃO, 2012; MARTINS, 2014).

O trabalho a ser apresentado segue estruturado em capítulos, quais seguem revisão da literatura, materiais e métodos, resultados e discussões, sugestões para trabalhos futuros, referências bibliográficas e os anexos.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O Petróleo

Segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP), “o petróleo é um material fóssil, oleoso e inflamável, de alto valor energético, geralmente menos denso do que a água, com cheiro característico e coloração que podem variar do incolor até o preto” (ANP, 2016).

O petróleo se origina de depósitos de matérias orgânicas junto a sedimentos, e a interação entre eles, com as condições termoquímicas apropriadas, irá favorecer a formação do petróleo. Após o processo de geração é necessário que haja a migração do mesmo para a rocha-reservatório (Figura 2). Para que não haja o risco de o petróleo migrar para outras áreas, é essencial que este encontre a rocha selante, que servirá de barreira devido a sua impermeabilidade, causando o aprisionamento do mesmo (THOMAS, 2004).



Figura 2. Geração, migração, acumulação e aprisionamento de petróleo em rochas sedimentares.

Fonte: Diário do pré-sal (2016).

Ao longo do processo de exploração do campo, realizado com o objetivo de extrair petróleo, são feitos estudos e projetos para que a perfuração do poço seja bem executada. Isso é fundamental para evitar perda financeira, uma vez que anualmente são perfurados números elevados de poços e que demandam bilhões de investimentos para este fim. Assim, quanto melhor for o planejamento desse processo, menor a probabilidade de insucesso. (ROCHA *et al.*, 2011).

2.2 A Perfuração

Na antiguidade, o petróleo era extraído por exsudação natural e sua exploração comercial teve início nos Estados Unidos, no ano de 1859. A exploração do poço de 21 metros se deu pelo sistema de percussão movido a vapor, gerando 2 m³/dia de óleo. Já no Brasil, o primeiro poço perfurado ocorreu no ano de 1897, 38 anos depois, por Eugênio Ferreira Camargo em Bofete, São Paulo. A profundidade do poço explorado atingiu 488 metros, produzindo 0,5 m³ de óleo (THOMAS, 2004).

O dicionário do petróleo define a perfuração como “atividade que envolve todas as operações necessárias para a construção de um poço até o momento de entregá-lo à equipe de completação” (FERNÁNDEZ *et al.*, 2014).

O processo de perfuração acontece por meio de uma sonda, onde o peso da broca e a rotação permitem que as rochas sejam perfuradas, gerando fragmentos que são sustentados pelo fluido de perfuração, que é injetado pelo interior da coluna por meio de bombas que irão permitir o retorno através do anular carregando os cascalhos para superfície.

Quando atinge uma profundidade específica a coluna de perfuração é retirada e uma nova coluna com diâmetro inferior é descida no poço, sendo que o anular entre os tubos e as paredes precisam ser cimentados para isolar as rochas atravessadas, possibilitando a continuidade no processo de perfuração (THOMAS, 2004).

A perfuração de poços se deu inicialmente em terra (*onshore*), já a perfuração em mar (*offshore*) surge no século XIX na Califórnia e as unidades de exploração empregadas eram bem simples, parecidas com as unidades *onshore*. A partir de então, novas tecnologias foram desenvolvidas buscando atender a necessidade de perfurações cada vez mais complexas. Atualmente existem plataformas que podem ser de exploração e produção ou exercer ambas as atividades (MORAIS, 2013).

2.2.1 Perfuração em camadas salinas

A Petrobras define o pré-sal como “uma sequência de rochas sedimentares formadas há mais de 100 milhões de anos no espaço geográfico criado pela separação do antigo continente Gondwana”.

Devido à separação dos continentes, depressões foram formadas dando origem a lagos. Depósitos de matérias orgânicas produziram rochas geradoras de petróleo e com o distanciamento cada vez maior dos continentes, águas do Oceano Atlântico foram cobrindo os espaços, onde promoveu o acúmulo de sal que chegam a dois mil metros de altura. Após processos termoquímicos, as matérias orgânicas se transformaram em hidrocarbonetos. Essa camada de sal localiza-se logo abaixo do nível do mar, por sua formação ter antecedido a formação das camadas que vieram em seguida. A Figura 3 apresenta o perfil geológico das camadas presentes nos campos do pré-sal.

As reservas de pré-sal no Brasil são as mais profundas de todo mundo, isso gerou grandes desafios tecnológicos e a Petrobras desenvolveu tecnologias próprias contando com colaboradores para o desenvolvimento de estudos em parcerias com centros de pesquisas e universidades (PETROBRAS, 2017).

Os principais desafios encontrados nas técnicas de exploração e produção de petróleo no pré-sal são: a distância entre a plataforma e o continente, a plataforma e o poço; as condições encontradas nas rochas em ambientes ultraprofundos; as questões climáticas e a presença de contaminantes.

A medida que a profundidade vai aumentando, aumenta-se também as dificuldades para exploração, uma vez que, a pressão da coluna d'água é muito maior nessas condições,

fazendo-se necessário o reforço nas estrutura dos equipamentos e dutos instalados nos solos marinhos (MORAIS, 2013).

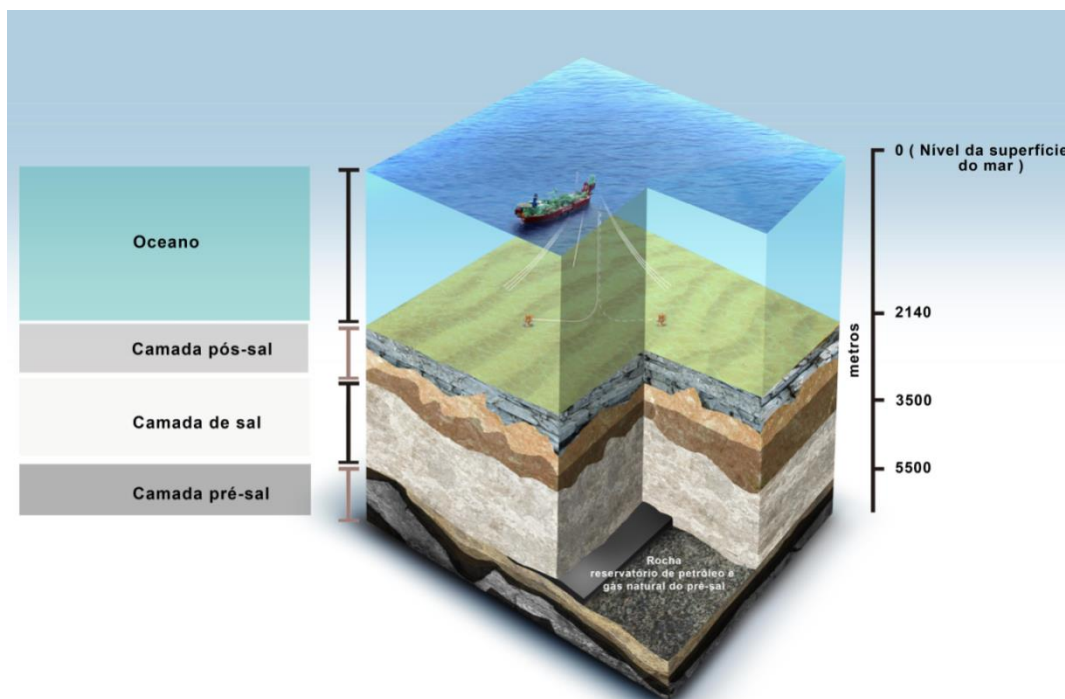


Figura 3. Camadas geológicas para compreensão da localização do pré-sal. Fonte: Diário do pré-sal (2016).

2.2.2 Exploração no Brasil

De acordo com Firme (2013) e Silva (2014), halita (NaCl), carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), taquidrita ($\text{CaCl}_2 \cdot \text{MgCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) e silvinita (KCl) são as principais sais presentes nas formações de evaporitos no Brasil, sendo a halita com maior abundância.

As prospecções tiveram início a partir de 2001 e em 2003 levantamentos de dados indicaram reais possibilidades de haver hidrocarbonetos na região do pré-sal. Em meados de 2003 foi tomada a decisão de desenvolver a perfuração. Entre os anos de 2005 a 2012, foram descobertos reservatórios gigantes e ultragigantes nas Bacias de Santos e Campos na camada do pré-sal e em 2010-2011 teve início da produção nessas camadas (MORAIS, 2013).

As rochas do pré-sal possuem 800 km de extensão, que vão do Espírito Santo a Santa Catarina. Pode chega a 3.000 km de profundidade em relação ao nível do mar e a exploração dessa área pode durar um grande período de tempo (MORAIS, 2013).

2.2.3 Identificação da presença de sal durante a perfuração

Segundo Rocha *et al.* (2011), as áreas salinas podem ser identificadas de acordo com a percepção do comportamento de parâmetros, que têm grande influência durante a perfuração, que são:

- Incorporação do sal perfurado, aumentando a quantidade de cloreto no fluido de perfuração;
- Alterações bruscas na taxa de penetração. A velocidade da perfuração pode diminuir ou aumentar expressivamente dependendo do tipo de rocha que está sendo perfurado, por exemplo, quando em contato com halita, a velocidade aumenta, quando em contato com anidrita (CaSO_4), a velocidade diminui;

- Alteração nas leituras dos perfis elétricos, como resistividade, densidade;
- Ausência de cascalhos pela utilização de fluido de perfuração à base de água ocasionado dissolução de sal.

Por esse e por outros motivos, o acompanhamento de todo processo de perfuração durante a fase de exploração e produção se faz necessário.

2.3 Os Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração são misturas de diversos compostos químicos, podendo conter substâncias sólidas, líquidas e em algumas situações gases. São utilizados para garantir uma perfuração eficiente e segura (CARDOSO *et al.*, 2005). Precisam ter características especiais, pois têm grande influência no custo da perfuração, uma vez que é necessário que as propriedades estejam adequadas em todo o processo para que haja a estabilidade do poço em diferentes pontos, no entanto, o custo para a preparação do fluido em si é baixa (DARLEY E GRAY, 1988).

Sendo assim, a escolha dos aditivos que serão empregados deve ser feita cuidadosamente de acordo com o tipo de poço a ser perfurado e as condições e propriedades que o poço apresenta (BALTAR E LUZ, 2003).

No processo de perfuração o fluido é bombeado através da coluna de perfuração, saindo pela broca e retornando a superfície por meio do espaço anular que fica entre a parede do poço e a coluna como mostra a Figura 4, carregando os cascalhos produzidos durante o processo de perfuração (SILVA, 2014). Desta forma, o fluido entra em contato com as paredes rochosas da formação e os cascalhos gerados.

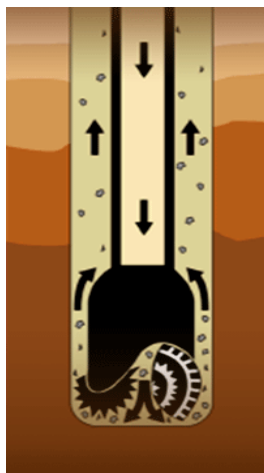


Figura 4. Circulação do fluido de perfuração. Fonte: Rigzone (2017).

2.3.1 As características dos fluidos de perfuração

Segundo Corrêa (2003), as principais funções que os fluidos de perfuração precisam ter são:

- Refrigerar a broca durante a perfuração;
- Ser capaz de manter os cascalhos suspensos e arrastá-los para a superfície durante a perfuração;
 - Ter densidade e tensão superficial o bastante para manter os cascalhos em suspensão caso haja necessidade de parar a perfuração;
 - Apresentar um peso em que a pressão de formação seja equivalente a pressão hidrostática, impedindo a ocorrência de *blowouts*;

- Não permitir que as características sejam influenciadas pelo aumento da temperatura do poço no decorrer da perfuração.

2.3.2 As classificações dos fluidos de perfuração

A classificação do fluido de perfuração é dada de acordo com o principal constituinte presente no fluido e a partir disso é possível conhecer suas características e propriedades. Segundo Thomas (2004), os fluidos de perfuração se classificam em: fluidos à base de água, fluidos à base de óleo e fluidos à base de gás. O primeiro será o foco do estudo deste trabalho.

Nos fluidos à base de água, esta é o principal componente presente na mistura (solvente), podendo adicionar componentes (soluto) de acordo com a necessidade do poço (THOMAS, 2004). A água pode ser dura (rica em sais Mg^{2+} e Ca^{2+}), doce ou salgada. Pode-se utilizar a água do mar no preparo dos fluidos e em determinadas situações utiliza-se águas saturadas com sal chamadas de salmoura, evitando a dissolução dos sais presentes nas paredes dos poços (LOMBA, 2007). A Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização do fluido de perfuração à base de água.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens do fluido de perfuração à base de água. Fonte: adaptado de Guimarães e Rossi (2007).

Vantagens	Desvantagens
Menos agressivo ao meio ambiente Baixo custo inicial Facilita na detecção de gás no poço Maior facilidade no combate à perda de circulação	Menor estabilidade em altas temperaturas Não podem ser usados em rochas ativas

2.3.3 As propriedades dos fluidos de perfuração

As propriedades físicas e químicas devem ser medidas com frequência para garantir a estabilidade do poço. A alteração brusca de uma delas pode ocasionar grandes problemas durante a perfuração, essas propriedades são:

- Massa específica
- Parâmetros reológicos
- Parâmetros de filtração
- Alcalinidade
- Salinidade
- Teor de bentonita
- Teor de sólidos
- Forças géis
- Concentração hidrogenada

2.3.4 Os principais aditivos dos fluidos de perfuração

Para produção de fluidos de perfuração, alguns aditivos ou a combinação deles são necessários para atender a demanda para manter as propriedades estáveis durante a perfuração dos poços (Tabela 2).

Tabela 2. Aditivos de fluidos de perfuração e suas funções. Fonte: adaptado de Rocha *et al.* (2011).

Material	Função
Goma xantana, bentonita, carboximetilcelulose	Viscosificantes
Amido, bentonita, lignitos	Controladores de filtrado
NaCl, KCl, polímeros catiônicos	Inibidores de hidratação da argila
Aminas	Emulsionantes
Cal hidratada, soda cálcica	Alcalinizantes
Barita, carbonato de cálcio	Adensantes
Carbonato de cálcio, fibras de celulose	Materiais de combate a perda de circulação
Tiriazina	Bactericida

Como promotor de viscosidade, a bentonita é um dos materiais mais utilizados na produção dos fluidos de perfuração por apresentar boas propriedades reológicas. Essa propriedade é importante para evitar que os cascalhos decantem prejudicando a perfuração (BALTAR E LUZ, 2003).

2.4 Reologia

Reologia é definida como a ciência do fluxo e da deformação da matéria (BARNES *et al.*, 1989). A palavra reologia deriva dos vocábulos gregos *rheo* = deformação e *logia* = estudo ou ciência (MACHADO, 2002). O termo é utilizado para indicar as propriedades de viscosidade, elasticidade e plasticidade de um fluido. De acordo com o comportamento reológico da relação de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação, os fluidos são divididos em duas categorias: newtonianos e não-newtonianos (MACHADO, 2002).

2.4.1 Tipos de fluidos

Os fluidos podem ser newtonianos e não-newtonianos e um dos parâmetros importantes medidos é a viscosidade definida como a resistência do fluido ao fluxo. A Figura 5 apresenta um gráfico com a representação dos possíveis comportamentos reológicos dos fluidos.

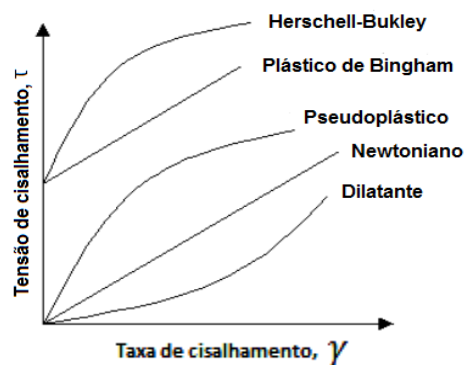


Figura 5. Curvas de escoamento de fluido newtoniano e fluido não-newtoniano. Fonte: adaptado de Machado (2002).

- **Fluidos newtonianos**

Os fluidos newtonianos são aqueles que obedecem à lei de Newton da viscosidade (Equação 1). A relação tensão de cisalhamento versus taxa de deformação caracteriza-se por apresentar curva constante, linear como apresentado pelo reograma da Figura 5 (MACHADO, 2002). São usados para representar alguns fluidos em condições normais, exemplos desses fluidos são: água, ar, petróleo, glicerol, betume, hidrogênio, óleo lubrificante (BARNES, 2000).

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (1)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, μ é a viscosidade dinâmica e γ é a taxa de deformação.

- **Fluidos não newtonianos**

Trata-se de fluidos cuja relação tensão cisalhante e taxa de cisalhamento não é linear. Esses tipos de fluidos são classificados de acordo com o comportamento reológicos e a correlação com um determinado modelo matemático (BENNETT E MEYERS, 1978). Fluidos não newtonianos podem ser representados pela Equação 2.

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

Onde, μ_a é a viscosidade aparente, τ é a tensão de cisalhamento e γ é a taxa de deformação.

Fluidos independentes do tempo

Esta subcategoria de fluido mantém a viscosidade aparente constante sem depender do tempo que é submetido a uma dada taxa de deformação, apresentando características semelhantes.

- ✓ **Sem limite de escoamento**

Não é necessária uma tensão de cisalhamento inicial para iniciar o fluxo do fluido.

- **Pseudoplástico** – Esse tipo de fluido apresenta um comportamento que ao se aplicar uma taxa de cisalhamento ocorre decréscimo na viscosidade aparente (BARNES *et al.*, 1989) e cessando o cisalhamento os materiais recuperam sua viscosidade. Exemplos de materiais que apresentam esse tipo de comportamento são suspensões coloidais e polímeros (BENNETT E MEYERS, 1978).
- **Dilatantes** – Ao contrário dos fluidos pseudoplásticos, os fluidos dilatantes apresentam acréscimo da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento (SCHRAMM, 2000).

- ✓ **Com limite de escoamento**

Para que esse tipo de fluido escoe, é necessária a aplicação de uma taxa de cisalhamento inicial. Os casos de fluidos que possuem limite de escoamento são Bingham e

Herschel-Bulkley (STEFFE, 1996). Exemplos desses tipos de fluidos são: fluido de perfuração, creme dental, graxa.

- **Bingham** – Possui um limite de escoamento inicial e apresenta comportamento linear pela relação tensão de cisalhamento e taxa de deformação, se não houver aplicação de tensão ou se ela for pequena, o fluido se comporta como sólido.
- **Herschel-Bulkley** – Possui limite de escoamento inicial, porém o comportamento apresentado é não linear, ou seja, há variação pela relação tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento.

Fluidos dependentes do tempo

Esta subcategoria de fluido possui comportamento de dependência da tensão de cisalhamento com o tempo para uma velocidade de cisalhamento constante, vide Figura 6.

✓ Fluidos reopéticos

Caracteriza-se pelo aumento da viscosidade aparente e a tensão cisalhamento, mantendo-se a mesma taxa de deformação. Quando submetidos ao repouso, recuperam a viscosidade inicial. O posicionamento das curvas ascendentes e descendentes em função do aumento e redução da taxa de cisalhamento indica a histerese, definida como o comportamento cíclico entre a variação de viscosidade e o tempo de duração do cisalhamento.

✓ Fluidos tixotrópicos

Possui uma considerável importância industrial, principalmente no que diz respeito a fluidos de perfuração. A viscosidade e a tensão de cisalhamento decrescem com o tempo, sendo que a taxa de deformação permanece constante. Fluidos tixotrópicos têm característica de permanecer em estado gel quando cessado o cisalhamento e sol ao reiniciar o cisalhamento, sendo possível reproduzir esse fenômeno diversas vezes (SCHRAMM, 2000).

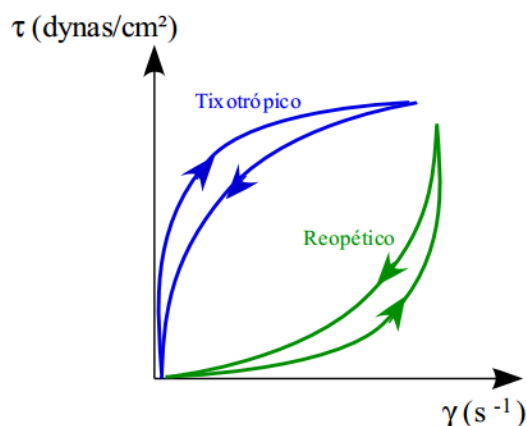


Figura 6. Curvas de fluidos tixotrópicos e reopéticos. Fonte: Skelland (1967).

2.5 Argila Bentonítica

De acordo dados da literatura, a palavra bentonita foi usada pela primeira vez para identificar um tipo de argila encontrada em Fort Benton Wyoming nos Estados Unidos e o

termo vem sendo utilizado para classificar a argila formada essencialmente por argilomineral montmorilonita que pertence ao grupo das esmectitas (LUZ E LINS, 2008). A composição do argilomineral é resultado principalmente do ambiente em que foi formado e é originada por alterações químicas sofridas pela formação de cinzas vulcânicas (CAENN *et al.*, 2014).

As argilas bentoníticas podem existir nas formas sódicas ou cálcicas a depender da característica de expansão que apresentam e do componente dominante em sua composição que pode ser o sódio ou o cálcio (LUZ E LINS, 2008). No Brasil a argila encontrada é a cálcica, porém há maior interesse comercial na argila sódica (TONNESEN *et al.*, 2012). Com isso, é possível transformar a argila cálcica em sódica com a utilização de carbonato de sódio, técnica patenteada pela Alemanha em 1933 e utilizada por outros países (LUZ E LINS, 2008).

Uma das principais características da bentonita sódica é a capacidade de expandir várias vezes seu volume ao entrar em contato com a água, enquanto que a cálcica essa expansão ocorre de modo reduzido (LUZ E LINS, 2005). O distanciamento entre as camadas devido a entrada de água é crescente à medida que ocorre a hidratação ao longo do tempo.

A distância interplanar presente entre as lamelas são normalmente de 10Å e pode chegar a 40Å quando entram em contato com água, variando de acordo com a camada de água que estará presente entre as folhas (SOUZA E SANTOS, 1989). A Figura 7 mostra o esquema da adsorção provocada pelo contato da bentonita e a água.

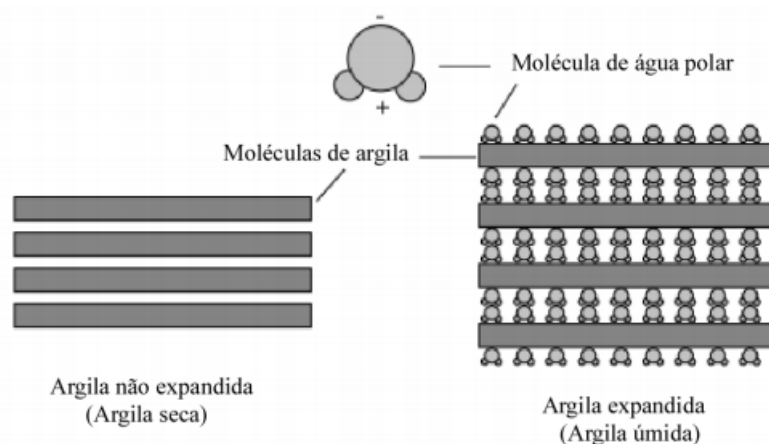


Figura 7. Adsorção de moléculas de água na superfície da argila. Fonte: Nelson (2017).

Estudos desenvolvidos ao longo dos anos apontaram que a bentonita é um material barato e prático para utilização em fluidos de perfuração com o objetivo de promover viscosidade ao fluido e possui comportamento reológico favorável para o processo de perfuração de poços. Esses comportamentos são importantes devido a estrutura reológica que assumem quando a perfuração é cessada, impedindo que os cascalhos soltos durante a perfuração decantem (BALTAR E LUZ, 2003).

Duman e Tunç (2009) e Abu-Jedayil (2011) estudaram a reologia de bentonitas sódicas e relataram que o aumento da concentração de bentonita e o tempo de hidratação são fatores que acarretam acréscimo da viscosidade aparente.

Estudos realizados por Nitawaki *et al.* (1981) apontaram que até uma determinada concentração de sal, a viscosidade aparente do fluido decresce e adicionando mais sal a viscosidade volta a subir. Yildiz *et al.* (1999) e Duman e Tunç (2009) explicam que o decréscimo da viscosidade é ocasionado pela compressão da dupla camada, que representa a camada cátions gerada ao redor das lamelas provocando distanciamento entre elas. Nitawaki *et al.* (1981) completam a explicação dizendo que em maiores concentrações de sal, a dupla camada começa a se afastar provocando o ganho de viscosidade aparente.

2.5.1 Composição das argilas

Argilas apresentam como características típicas a granulação fina com propriedades coloidais e plásticas, suas propriedades físicas podem sofrer variações, essas variações normalmente têm ligação com os cátions trocáveis.

As argilas são compostas por lamelas sobrepostas e Pereira (2001) representa essa ideia dando exemplo de cartas de baralho como representado pela Figura 8. As dimensões das lamelas são variáveis, com espessura mínima de 10Å onde cada milímetro tem capacidade de comportar 1.000.000 de lamelas.

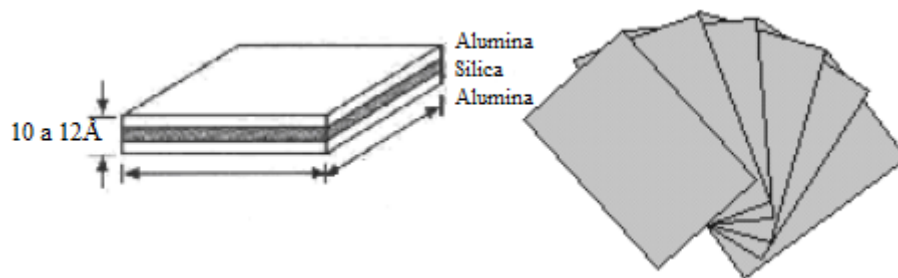


Figura 8. Distância entre as lamelas e agregação em forma de cartas de baralho. Fonte: adaptado de Pereira (2001).

A estrutura cristalina dos argilominerais é constituída por grupos octaédricos e tetraédricos de íons ou átomos de oxigênio e íons hidroxila ao redor dos cátions. Folhas tetraédricas se ligam as folhas octaédricas formando as lâminas compostas por três camadas identificadas como 2:1, que representam duas camadas tetraédricas ligadas a uma octaédrica como mostra a Figura 9 (SOUZA SANTOS, 1989). As cargas negativas estão localizadas em toda superfície (maior dimensão) e as cargas positivas estão localizadas nas laterais (menor dimensão).

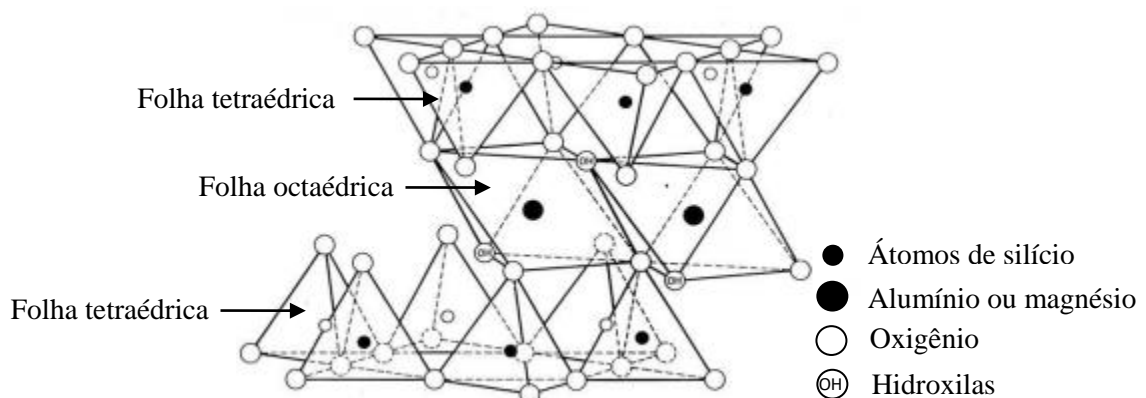


Figura 9. Ligação entre as duas folhas tetraédricas e uma octaédrica por meio de átomos de oxigênio compartilhados. Fonte: Darley e Gray, 1988.

Se comparada a outros argilominerais a montmorilonita possui elevada capacidade de troca catiônica. A capacidade de troca ocorre principalmente pelo excesso de cargas negativas geradas pelo contato da bentonita com a água. Grim (1939) explica que na folha octaédrica o magnésio pode ser substituído pelo alumínio, ocasionando o excesso de carga na superfície da rede. O alumínio pode ser substituído pelo ferro, não provocando alteração de cargas. Outra

possibilidade de troca ocorre na camada tetraédrica, em que o silício pode ser substituído pelo alumínio, nesse caso, irá ocorrer uma sobrecarga.

2.5.2 Sistemas coloidais

Segundo Darley e Gray (1988) colóides são as menores partículas possíveis de serem vistas em um microscópio. Nos sistemas coloidais, as partículas são consideravelmente pequenas e por isso são mantidas em suspensão devido ao bombardeamento das moléculas de água. Além disso, os fenômenos de superfície controlam a velocidade de sedimentação e viscosidade devido ao pequeno tamanho das partículas (DARLEY E GRAY, 1988).

Os colóides são carregados negativamente e atraem íons de cargas opostas presentes na água que são chamados de contra-íons. O afastamento das lamelas gerado pelas cargas positivas é chamado de dupla camada, sendo as camadas de cargas que mais se afastam das partículas chamadas de camadas difusas (Figura 10) (CASTELLAN, 1998).

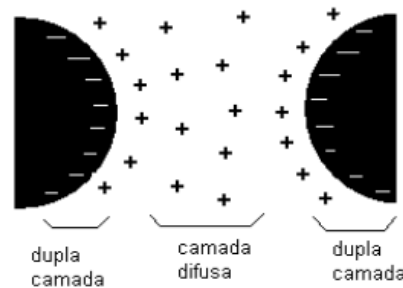


Figura 10. Ilustração da dupla camada difusa. Fonte: Castellan (1998).

A água pura impede a aglomeração das partículas devido à dupla camada difusa, o processo de aglomeração acontece com adição de eletrólitos que provocam a compressão das duplas camadas e a força de atração gerada, provoca a floculação. É possível observar a floculação a olho nu, uma vez que os vazios entre os flocos tornam-se visíveis.

Quando ocorre a floculação as partículas coloidais possuem característica de se manter em suspensão por ser extremamente pequenas. Dependendo da quantidade de eletrólitos e de bentonita adicionados, a gelificação se intensifica, provocando aumento da viscosidade e grandes quantidades de sal provocam gelificação praticamente instantânea. Para reversão do quadro pode-se utilizar defloculantes em que o estado gelificado volta ao estado liquefeito da suspensão.

A floculação é um termo de química coloidal clássica, porém quando se trata de perfuração utiliza-se o termo agregação para explicar o fenômeno de compressão da dupla camada. A agregação trata do inverso do espaçamento provocado pela expansão, ou seja, junção das lamelas provocada pelo colapso da dupla camada, enquanto que a floculação trata da fraca associação das lamelas que formam estrutura gel. Agregados são representados por lamelas unidas paralelamente com espaçamento de 20\AA que provoca diminuição na força gel se comparada com a floculação, uma vez que pelas lamelas estarem estruturadas paralelamente, elas perdem área de interação entre a água e as partículas.

A dispersão é a subdivisão de agregados, ou seja, as lamelas estarão unidas paralelamente, porém dispersas. É importante mencionar que floculação e defloculação são diferentes de agregação e dispersão.

2.6 Dissolução de Sais

A dissolução de sais está diretamente relacionada à transferência de massa, que trata as questões relacionadas à misturas. A caracterização da transferência de massa se dá pela transferência de certas substâncias (soluto) por intermédio de outra substância (solvente) em escala molecular (TREYBAL, 1981). O soluto faz alusão ao que está sendo transferido, enquanto que o solvente trata do meio pelo qual o soluto é transferido.

Segundo Incropera *et al.* (2007), a transferência de massa é ocasionada pela diferença de concentração de uma determinada espécie em uma mistura, em que o gradiente de concentração fornece a força motriz necessária para o transporte da espécie (Figura 11).

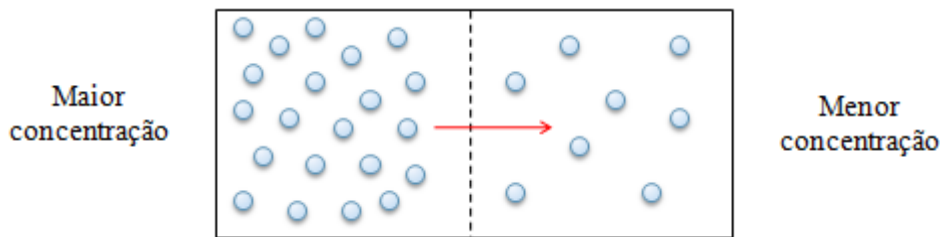


Figura 11. Fluxo de transporte de solutos. Fonte: adaptado de Incropera *et al.* (2007).

A concentração de soluto irá influenciar diretamente na transferência de massa devido às interações moleculares, para esse tipo de interação diz-se contribuição difusiva que é a força motriz necessária para o movimento. Para que ocorra a contribuição convectiva é necessário que haja ação do meio externo como por exemplo a diferença de temperatura que poderá auxiliar no transporte (CREMASCO, 2002).

CreMASCO (2002) faz essa representação matematicamente como:

$$\text{Movimento da matéria} = \frac{\text{Força motriz}}{\text{Resistência ao transporte}} \quad (3)$$

De acordo com a equação 3 é possível perceber que o movimento da matéria é inversamente proporcional a resistência durante o transporte.

2.6.1 Coeficiente convectivo de transferência de massa

A convecção mássica é um fenômeno que ocorre a nível macroscópico, cuja a força motriz é a diferença de concentração. A resistência ao transporte relaciona-se a interação do soluto-meio com uma força externa (BIRD *et al.*, 2002).

Considerando um soluto que se difunde em líquido em regime permanente, pode-se considerar o coeficiente de transporte de massa como K, apresentado pela Equação 4.

$$N_{A,z} = K(C_A - C_{A\infty}) \quad (4)$$

Onde $N_{A,z}$ é o fluxo molar do soluto A na direção z, K é o coeficiente convectivo de transferência de massa e $(C_A - C_{A\infty})$ é a diferença de concentração. Para esse caso, a força motriz é a diferença de concentração, indicando que o coeficiente convectivo está relacionado com a resistência à transferência de massa (Equação 5).

$$K \equiv \frac{1}{(\text{Resistência à convecção mássica})} \quad (5)$$

Para conhecer o K é necessário conhecer o meio no qual o transporte do soluto ocorre.

2.6.2 Cinética de dissolução de sais

Simon (1981) estudou a taxa de dissolução de NaCl e KCl em soluções aquosas utilizando um aparato experimental em formato cilíndrico com um pá de agitação. O autor trabalhou em velocidade de agitação de 200 RPM como mostra a Figura 12, com objetivo de entender qual é o efeito da temperatura na dissolução do sal.

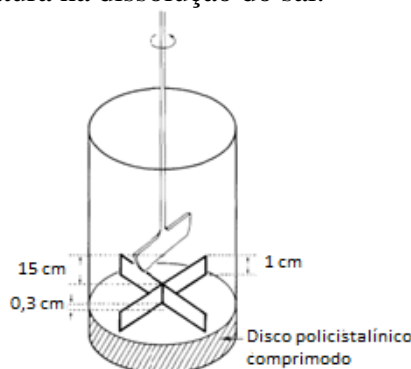


Figura 12. Célula de dissolução. Fonte: Simon (1981).

A cinética de dissolução é dada por:

$$V = K_0(C_s - C) \quad (6)$$

Onde V é a taxa superficial de dissolução, K_0 é o coeficiente de transferência de massa, C_s é a concentração de saturação e C a concentração da solução.

A Tabela 3 apresenta a taxa de dissolução de NaCl e KCl em água pura para diferentes temperaturas.

Tabela 3. Taxa de dissolução de NaCl e KCl (cm/s) x 10^3 em água pura para diferentes temperaturas. Fonte: adaptado de Simon (1981).

T(°C)	9	14	20	23,5	26	27	43
NaCl		0,48	0,55		0,69		1,04
KCl	0,46		0,73	0,82		1,26	

De acordo com a Tabela 3 é possível perceber que quanto maior é a temperatura, maior é o coeficiente de dissolução, ou seja, o aumento da temperatura favorece a ocorrência da dissolução.

Um dos principais trabalhos encontrados sobre esse assunto foi o de Aksel'rud *et al.* (1992) que é referência até os dias atuais.

Aksel'rud *et al.* (1992) utilizaram um aparato experimental proposto por Zdanovskii fazendo algumas modificações com intuito de identificar experimentalmente o coeficiente de transferência de massa de diferentes sais em suspensão. A Figura 13 mostra esquematicamente o aparato experimental para dissolução de sal, que trabalha em circuito fechado.

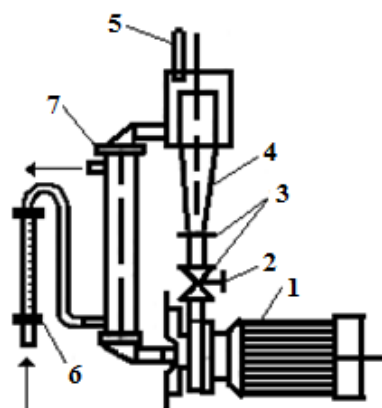


Figura 13. Aparato experimental para determinação do coeficiente de transferência de massa para partículas em fluxo líquido. Fonte: Aksel'rud *et al.* (1992).

É possível identificar na Figura 13 a bomba centrífuga elétrica (1) que fornece solvente para o reator (4). A vazão do solvente é controlada pela válvula (2) possibilitando a circulação das partículas. O solvente é resfriado por um trocador de calor coaxial (7) com a vazão da água de resfriamento realizada pelo rotâmetro (6) e a temperatura do solvente medida por termômetro (5). Na parte inferior (cilíndrica), foram instaladas duas telas de bronze (3).

A equação utilizada pelos autores para identificar o coeficiente de transferência de massa, considerou a concentração de sal em função do tempo, como apresentado na Equação 7.

$$-\frac{dm_{sal}}{dt} = K \cdot A(C^* - C) \quad (7)$$

Onde m_{sal} é a massa de sal solubilizada, t é o tempo, K o coeficiente de transferência de massa, A é área total da transferência de massa, C^* é a concentração de saturação do sal, C é a concentração instantânea do sal.

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos no trabalho.

Tabela 4. Valores dos coeficientes de transferência de massa. Fonte: Aksel'rud *et al.* (1992).

Sal	$K \cdot 10^4$ (m/s)
KI	3,15
KBr	2,069
K₂Cr₂O₇	0,868
K₂SO₄	0,731
NaNO₃	0,881
NaNO₂	0,458
NaCl	1,00
(NH₄)₂Cr₂O₇	0,793
KCl	1,338
(NH₄)₂SO₄	0,652
NH₄NO₃	1,169
NH₄Cl	1,052

Alkattan *et al.* (1997) também estudaram a cinética da dissolução da halita (NaCl), e a equação adotada para encontrar a taxa de dissolução foi dada pela Equação 8, que representa a variação de cada íon de sal por tempo.

$$\left(\frac{dm_{Na^+}}{dt}\right) = \left(\frac{dm_{Cl^-}}{dt}\right) = K_t(C_{sat} - C^*) \quad (8)$$

Onde C_{sat} é a concentração de saturação da halita, C^* é a concentração instantânea da halita e K_t é o coeficiente de transferência de massa determinado pela Equação 9, que é a razão do D_{AB} coeficiente de difusão e o δ coeficiente de camada limite.

$$K_t = \frac{D_{AB}}{\delta} \quad (9)$$

A partir da necessidade de aprofundamento nos assuntos da cinética da dissolução de sal em fluido de perfuração, trabalhos sobre o tema vem sendo desenvolvidos no Laboratório de Escoamento de Fluidos, tendo início no estudo realizado por Magalhães *et al.* (2011).

Magalhães *et al.* (2011) realizaram o estudo da determinação do coeficiente de transferência de massa do cloreto de sódio em água em taque de mistura. O estudo teve como base o desenvolvimento de uma modelagem matemática que fornece o coeficiente convectivo de transferência de massa em função da variação da concentração da solução com o tempo, e o modelo proposto para tal estudo foi uma modificação do modelo utilizado por Aksel'rud *et al.* (1992) Equação 10.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K.A_p(C^* - C)}{V} \quad (10)$$

Onde C é a concentração instantânea de cloreto de sódio na solução, t é o tempo, K é o coeficiente de transferência de massa, A_p é a área superficial para uma população de sólidos, C^* é a concentração de saturação e V é o volume da solução.

Para determinação da área propuseram que ao invés de considerar a massa da partícula, pudesse generalizar usando a massa total da população através da Equação 11.

$$A = \frac{\pi N_p}{\phi} \left(\frac{6 \cdot (m_p - V \cdot (C - C_{inicial}))}{\rho_s \cdot \pi \cdot N_p} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

Onde A é a área superficial da população, N_p é o número de partículas da população, ϕ é a esfericidade da partícula, m_p é a massa total da população, V é o volume total da solução, ρ_s é a densidade do sólido.

O número de partículas N_p pode ser determinado pela Equação 12.

$$N_p = \frac{6 \cdot m_p}{\rho_p \cdot \pi \cdot d_p^3} \quad (12)$$

Os valores de K encontrados variaram de $1,55 \times 10^{-5}$ a $8,94 \times 10^{-5}$ m/s de acordo com a temperatura avaliada. O autor percebeu que quanto maior a temperatura e a velocidade de agitação, maior é o valor de K .

Patrão (2012) estudou a dissolução de partículas de NaCl no escoamento em salmoura com concentração de 32 g/L de sal. O escoamento foi avaliado através de calhas com 29 metros de extensão. Observou-se os perfis de concentração para diferentes condições operacionais, com tomadas de concentração realizadas ao longo do escoamento. Para o estudo o modelo desenvolvido por Magalhães *et al.* (2011) foi modificado e avaliado. O coeficiente

global de transferência de massa foi estimado pela modelagem matemática, o autor encontrou para K o valor de $5,44 \times 10^{-4}$ m/s. Observou-se que a dissolução ocorre mais rapidamente nos primeiros metros percorridos pela salmoura. A Figura 14 mostra a comparação entre a concentração obtida experimentalmente e dada pela simulação, com desvios inferiores a 10%.

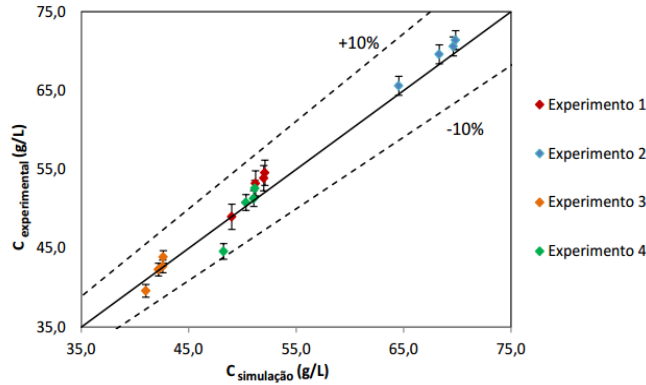


Figura 14. Comparação entre a concentração obtida experimentalmente e dada pela simulação. Fonte: Patrão (2012).

Dando continuidade ao trabalho de Patrão (2012), Martins (2014) utilizou o mesmo aparato experimental no escoamento de salmouras com concentrações iniciais de sal de 32, 90, 175 e 258g/L. Para os perfis foram utilizadas concentrações previstas no planejamento experimental como máximos e mínimos. Encontrando-se para K o valor variando entre $1,8 \times 10^{-4}$ a $5,4 \times 10^{-4}$ m/s. Ele observou que quanto maior a concentração de sal na salmoura, mais lenta é a dissolução devido à competição entre os sólidos em contato com solvente. A Figura 15 mostra o coeficiente de transferência de massa em função da concentração da fase líquida.

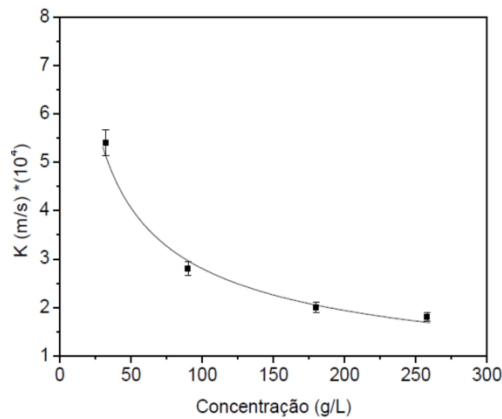


Figura 15. K em função da concentração da fase líquida. Fonte: Martins (2014).

Magalhães *et al.* (2014) estudaram a dissolução de cloreto de sódio em dois tipos de unidades experimentais, em sistemas agitados em tanque de mistura e unidade de escoamento em calhas. O objetivo foi avaliar os efeitos da temperatura e do grau de agitação na cinética de dissolução, verificando que a medida que a agitação e temperatura do sistema aumentavam, havia acréscimo na cinética de dissolução, por se tratar de duas condições que afetam a camada limite de transferência de massa. Um modelo matemático foi utilizado para unidade de escoamento que utiliza duas equações diferenciais parciais. Os valores obtidos em bancada e o calculado para unidade de escoamento apresenta desvios inferiores a 10% como mostra a Figura 16.

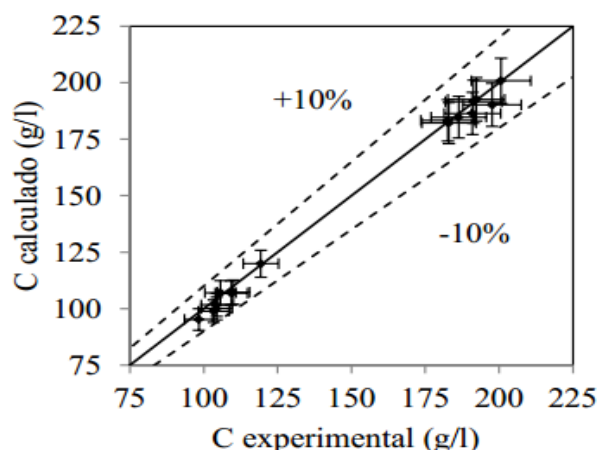


Figura 16. Concentração experimental versus calculada para unidade de escoamento. Fonte: Magalhães *et al.* (2014).

Na sequência da linha de pesquisa, Meneses (2016) investigou como a dissolução de partículas de NaCl ocorre em fluidos não-newtonianos contendo goma xantana. Foi utilizado um tanque de mistura com salmoura em diferentes concentrações de sal para diferentes concentrações de goma xantana. O autor observou decréscimo no valor do coeficiente convectivo de transferência de massa com o aumento da concentração de goma xantana. O mesmo ocorreu com o aumento da concentração de sal. Esse decréscimo indica que a dissolução ocorreu mais lentamente com o aumento das concentrações. Os valores de K encontrados pelo autor variaram de $0,526$ a $0,803 \times 10^{-4}$. O modelo utilizado foi baseado na conservação de massa para as fases líquida e sólida, sendo baseado na modelagem utilizada por Martins (2014). Além disso ele considerou que o diâmetro médio das partículas de sal diminuem ao longo do processo de dissolução, propondo uma equação para representar este fenômeno. A Figura 17 mostra um exemplo do perfil de concentração experimental ajustado para o experimento com 1 lb/bbl de goma xantana e 98g/L de sal.

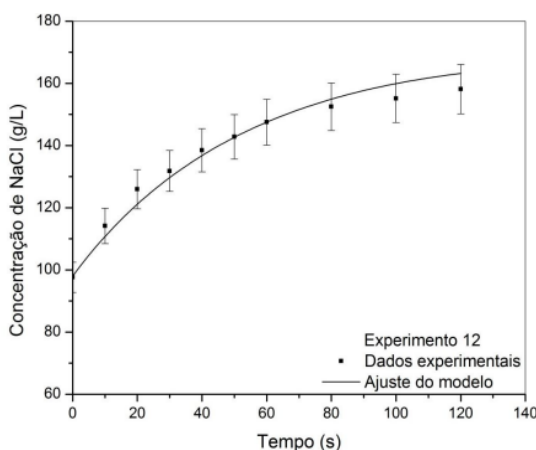


Figura 17. Perfis de concentração experimental e ajustado para o experimento com 1 lb/bbl de goma xantana e 98g/L de sal. Fonte: Meneses (2016).

Dando continuidade ao trabalho de Meneses (2016), o estudo desenvolvido nesta dissertação, estuda a dissolução de partículas de sal em fluidos à base de água viscosificados com bentonita. Não foram encontrados na literatura trabalhos que estudem o comportamento da dissolução de sal e o coeficiente convectivo de transferência de massa em fluidos viscosificados com bentonita.

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os materiais e equipamentos utilizados, assim como as técnicas empregadas para o desenvolvimento dos experimentos de reologia e de cinética, incluindo o descritivo da modelagem matemática.

Os materiais utilizados na preparação dos fluidos foram bentonita sódica M-200 Vale do Juquiá, água deionizada, e sal comercial (NaCl).

A Figura 18 apresenta o fluxograma de atividades desenvolvidas neste trabalho.

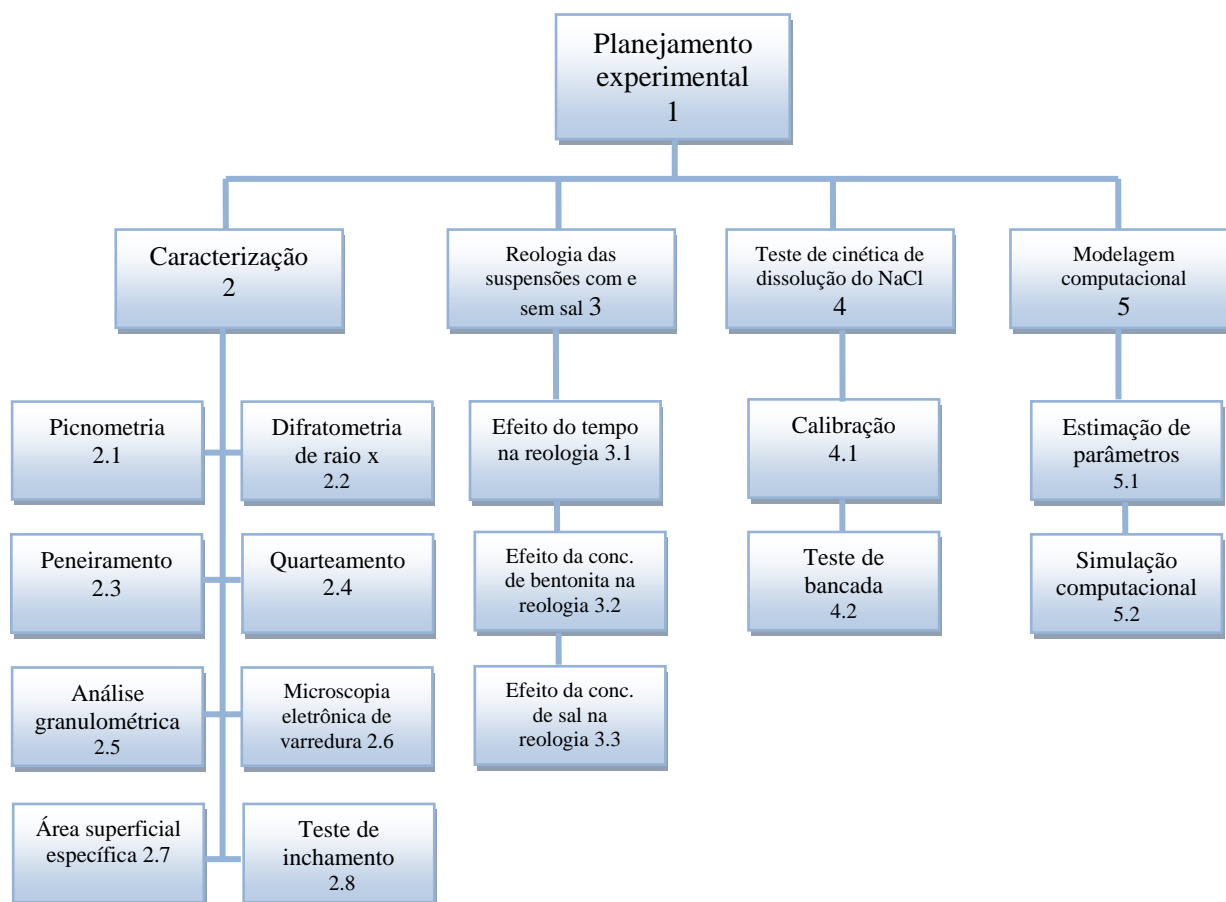


Figura 18. Fluxograma da estrutura do trabalho.

O fluxograma da Figura 18 apresenta os passos seguidos para a execução desta pesquisa. Inicialmente foi realizado um planejamento experimental (1), base para o trabalho experimental, passando pela etapa de caracterização da bentonita através dos (2) testes de picnometria (2.1), difratometria de raio X (2.2), peneiramento (2.3), quarteamento (2.4), análise granulométrica (2.5), microscopia eletrônica de varredura (2.6), área superficial específica (2.7), teste de inchamento (2.8). Em seguida foram realizados os testes de reologia (3), necessário para a compreensão do comportamento reológico das suspensões do material na presença e ausência de sal em diferentes concentrações. Para tal foram analisados o efeito do tempo na reologia (3.1), o efeito da concentração de bentonita na reologia (3.2) e o efeito da concentração de sal na reologia (3.3). Dando sequência foram desenvolvidos os testes de cinética (4) com diferentes concentrações de NaCl e bentonita, realizando inicialmente a calibração (4.1) e em seguida os testes de dissolução de sal (4.2). Com os dados obtidos e a

modelagem computacional já disponível (5), foi possível estimar o coeficiente global de transferência de massa (5.1) e por fim realizar as simulações computacionais (5.2) para geração dos gráficos comparativos entre os resultados experimentais e os simulados.

3.1 Planejamento Experimental

O planejamento experimental escolhido para os testes de cinética foi o 3^2 , ou seja, trabalha-se 2 fatores em 3 níveis realizando triplicata em todos os pontos. A Figura 19 apresenta a correlação das concentrações de bentonita e concentrações de sal selecionadas para o presente trabalho.

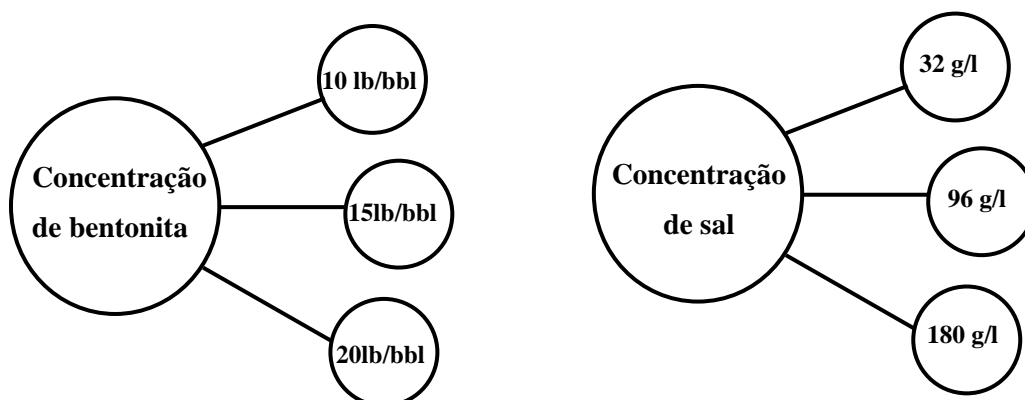


Figura 19. Correlação das combinações das concentrações de bentonita com as concentrações de sal.

Pode-se verificar que são realizadas combinações de 10 lb/bbl de bentonita com 32 g/L, 96 g/L e 180 g/L de sal, 15 lb/bbl de bentonita com 32 g/L, 96 g/L e 180 g/L de sal e 20 lb/bbl de bentonita com 32 g/L, 96 g/L e 180 g/L para os estudos de cinética de dissolução. Este último é realizado com a adição de 85 g de sal ao fluido previamente preparado. Adicionalmente foram realizados testes reológicos com e sem a presença de sal. A Tabela 5 apresenta o planejamento experimental.

Tabela 5. Planejamento experimental 3^2 totalizando 9 experimentos.

Nº do experimento	Concentração de bentonita (lb/bbl)	Concentração inicial de sal (g/L)
1	10	32
2	15	32
3	20	32
4	10	96
5	15	96
6	20	96
7	10	180
8	15	180
9	20	180

3.2 Caracterização dos Materiais

3.2.1 Picnometria

O experimento de picnometria foi realizado em triplicata para determinar a densidade da bentonita em estado sólido. A densidade do cloreto de sódio está disponível na literatura sendo seu valor de 2,16 g/cm³ (PERRY, 1973).

O picnômetro (Figura 20) foi utilizado para determinação da densidade da bentonita. Inicialmente aferiu-se a massa do picnômetro vazio (m_1), a massa do picnômetro com a bentonita em seu interior (m_2), a massa do picnômetro com a bentonita e álcool (m_3) em seu interior, e por último a massa do picnômetro com o álcool em seu interior (m_4). Com esses dados calcula-se a densidade do sólido pela Equação 13 (PEÇANHA, 2014).

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \times \rho_{referência} \quad (13)$$



Figura 20. Picnômetro. Fonte: Pró-análise (2016).

3.2.2 Difratometria de raios X

A difratometria de raio X foi utilizada para caracterizar quimicamente a argila, com o objetivo de identificar os componentes presentes na bentonita M-200, sendo gerado o difratograma apresentando os picos característicos dos compostos encontrados na amostra.

No momento em que um feixe de raios X entra em contato com um cristal em diferentes ângulos, o feixe é difratado e medido por um detector de raios X, produzindo um difratograma ou perfil de raios X. O é um gráfico gerado exclusivo para cada tipo de cristal (AMORIM, 2007). Essa técnica não destrói o material durante sua realização e tem sido largamente aplicado em indústrias e por pesquisadores (AMORIM, 2007).

Os difratogramas da argila foram obtidos pelo equipamento Rigaku Miniflex (Figura 21) operando a tensão de 30 kV e corrente de 15 mA, varredura de 1,1 a 60° (2θ) adotando um intervalo de 0,050° no tempo de aquisição de 2 s.



Figura 21. Difrator de raios X. Fonte: Rigaku (2016).

3.2.3 Quarteamento do sal

Optou-se por utilizar as partículas menores do que 4 mesh, proporcionando a seleção através do peneiramento, foi realizado a homogeneização do sal pela técnica de quarteamento, a qual é largamente utilizada na indústria de mineração.

Existem variados métodos para realização do quarteamento, para o presente estudo, adotou-se a técnica de pilha cônica, em que a massa total de sal foi dividida em massas menores, em seguida agregadas para se obter uma pilha cônica única do material devidamente homogêneo.

A Figura 22 apresenta o processo inicial de quarteamento que mostra as pilhas cônicas separadas em quatro alíquotas, a Figura 23 mostra a pilha cônica final do material.



Figura 22. Amostras subdivididas de sal pela técnica de pilha cônica.



Figura 23. Amostra final do sal homogeneizado.

3.2.4 Análise granulométrica dos sólidos

Para fazer a análise granulométrica dos materiais particulados, foi utilizado o equipamento Malvern - Mastersizer 2000 Hydro 2000 UM, como mostra a Figura 24. Para que a amostra se mantenha homogeneizada e suspensa, a mesma é recirculada por meio da janela de medição que determina o tamanho das partículas pela técnica de difração a laser. Os resultados são apresentados graficamente e expressos em percentual do volume que permite analisar uma faixa que varia de 0,02 a 2000 μm .

O álcool foi utilizado para análise da bentonita para evitar o inchamento da mesma, enquanto que para análise do sal utilizou-se parafina líquida para evitar a dissolução durante a análise.



Figura 24. Analisador de partículas com difração a laser. Fonte: Malvern (2016).

3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura

A técnica de microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para caracterizar a bentonita a partir de imagem, pois com a aproximação é possível identificar os arranjos, aglomerações, formas, dimensões e o modo como se distribuem.

As aproximações 100, 800 e 1500x foram adotadas e o equipamento utilizado foi o MEV da Hitach-TM 3000 (Figura 25).



Figura 25. Equipamento MEV da Hitach-TM 3000.

3.2.6 Área superficial específica

A análise da área específica da bentonita foi aferida utilizando o equipamento ASAP 2020 da marca Micrometrics Instrument Corporation. É um parâmetro importante quando se trata de identificar a interação que ocorre entre sólido e fluido, medido em m^2/g e a partir do

seu *software* do próprio equipamento são fornecidos os cálculos pelo método de BET – Multipoint (Brunauer-Emmet-Teller).

3.2.7 Teste de inchamento

O equipamento utilizado para medir o inchamento da argila foi o Linear Swell Meter – LSM, realizado em duplicata. A medida do inchamento é feita pela expansão volumétrica de uma pastilha de argila preparada adicionando-se 10,5 gramas de bentonita seca em uma célula de compressão (Figura 26). Após preparada, a pastilha é submersa em um recipiente com fluido. Neste caso, o fluido utilizado foi água e bentonita preparado no agitador Hamilton Beach com concentração de 15 lb/bbl. Durante a medição do inchamento ao longo do tempo, um gráfico é gerado a partir do *software* M4600daq™ e a duração do teste foi de 7 dias. A Figura 27 apresenta o equipamento LSM – Linear Swell Meter.



Figura 26. M4600 célula de compressão. Fonte: Manual Grace instruments.



Figura 27. M4600 HPHT LSM (Linear Swell Meter) - Medidor de inchamento. Fonte: Manual Grace instruments.

3.2.8 Balança de lama

As suspensões preparadas foram pesadas na balança de lama Fann modelo 140 (Figura 28) objetivando conhecer a densidade dos fluidos. Dado necessário na alimentação de entrada na simulação feita pelo programa Fortran e também pela importância de caracterizar a suspensão.



Figura 28. FANN Balança de Lama. Fonte: Eurosul (2016).

3.2.9 Agitador Hamilton

O equipamento Hamilton Beach Fann (Figura 29) foi utilizado como ferramenta de agitação com velocidade de 18000 RPM no preparo das suspensões combinadas de acordo com o planejamento experimental (Tabela 5). O tempo de agitação padronizado no preparo da suspensão foi de 20 minutos. Na ausência de sal, adicionava-se a bentonita ao solvente e a suspensão permanecia agitando por 20 minutos. Com adição de sal, a bentonita era misturada ao solvente e permanecia agitando por 15 minutos, a partir de então, o sal era adicionado, permanecendo agitando por mais 5 minutos restantes, totalizando os 20 minutos.



Figura 29. Agitador Hamilton Beach. Fonte: Eurosul (2016).

3.3 Reologia

Os testes reológicos objetivaram obter os reogramas referentes aos fluidos preparados combinando bentonita nas concentrações (10lb/bbl, 15lb/bbl e 20lb/bbl) com as concentrações de sal de (0g/L, 32g/L, 96g/L e 180g/L). Análise do efeito da concentração de bentonita, o efeito da concentração de sal e o efeito do tempo na reologia foram realizados. Cada fluido foi analisado 1 vez ao dia durante 6 dias de observação a temperatura de 25°C. A Tabela 6 apresenta as combinações das concentrações de preparação de cada fluido.

Tabela 6: Formulação das suspensões de bentonita

Nº do experimentos	Concentração de bentonita (lb/bbl)	Concentração de sal (g/L)
1	10	0
2	15	0
3	20	0
4	10	32
5	15	32
6	20	32
7	10	96
8	15	96
9	20	96
10	10	180
11	15	180
12	20	180

O reômetro modelo Haake RheoStress 1 da marca Thermo Scientific (Figura 30), foi o equipamento utilizado na medição da reologia dos fluidos. A geometria utilizada foi a de cilindros coaxiais, copo DG43 e rotor cilíndrico DG43-Ti (Figura 31). A taxa de deformação foi controlada no intervalo de 0,1 a 1021 s^{-1} e o controle da temperatura foi feito pelo banho Haake térmico com variação de mais ou menos 0,3°C modelo K10 (Figura 32).



Figura 30. Reômetro Haake RheoStress 1 - Thermo Scientific. Fonte: Thermo Fisher (2016).



Figura 31. Foto da geometria de cilindros coaxiais.



Figura 32. Foto do banho de água utilizado para controlar a temperatura.

3.4 Cinética de Dissolução

Os testes de cinética objetivaram avaliar como a dissolução de partículas de NaCl ocorre em fluidos preparados com bentonita, água e sal. As combinações apresentadas no planejamento experimental (Tabela 5), na temperatura de 25°C foram estudadas.

O sistema agitado foi dimensionado à partir de informações fornecidas por Cremasco (2002) (Figura 33). O aparato experimental utilizado é constituído de um sistema de mistura (Figura 34), um agitador da marca Fisatom com duas hélices navais (Figura 35), banho de água da marca Brookfield (Figura 36) e um medidor de condutividade S230 SevenCompact™ da marca Mettler Toledo (Figura 37).

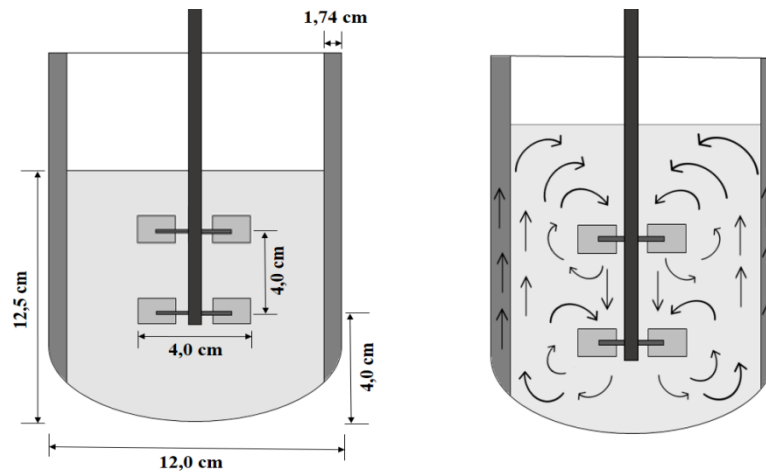


Figura 33: Esquema das medidas adotadas para o aparato experimental.



Figura 34. Béquer utilizado como sistema de mistura.



Figura 35. Misturador Fisatom. Fonte: Fisatom (2016).



Figura 36. Banho de água. Fonte: Brookfield (2016).



Figura 37. Medidor de condutividade S230 SevenCompactTM. Fonte: Mettler Toledo (2016).

A visão global do aparato experimental seus respectivos componentes está representada pela Figura 38 e a Figura 39.



Figura 38. Unidade utilizada para realização dos testes de cinética de dissolução de sal.

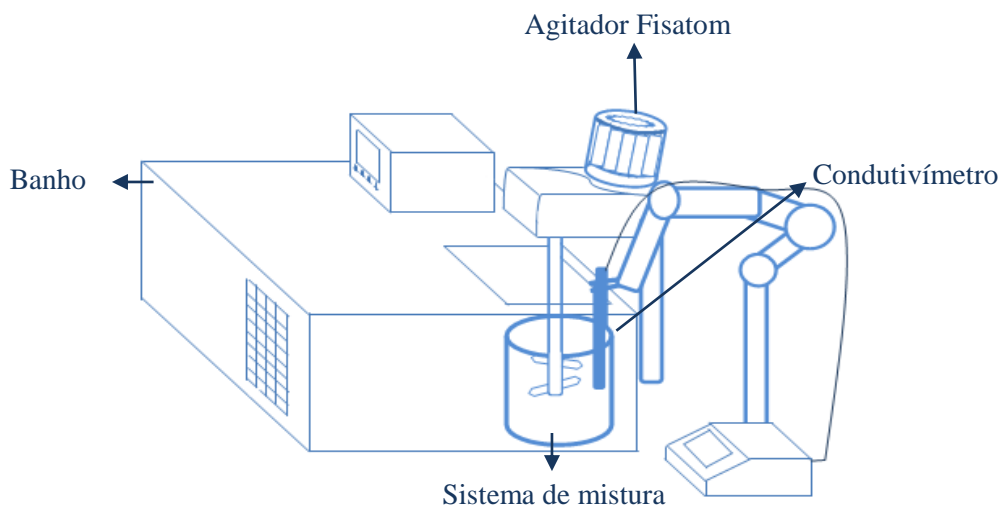


Figura 39. Esquema da unidade utilizada para realização dos testes de cinética de dissolução de sal.

A concentração de sal na suspensão foi determinada com o auxílio do condutivímetro. Para isso fez-se calibrações para as concentrações de bentonita de 10, 15 e 20 lb/bbl até atingir a saturação do sal. A calibração tinha como ponto inicial 30 g de sal sendo adicionados 20 g de sal a cada 5 minutos. A condutividade era medida até a estabilidade. A temperatura para cada calibração foi de 25°C e a velocidade de agitação de 2000 RPM.

A Figura 40 apresenta uma curva típica de calibração.

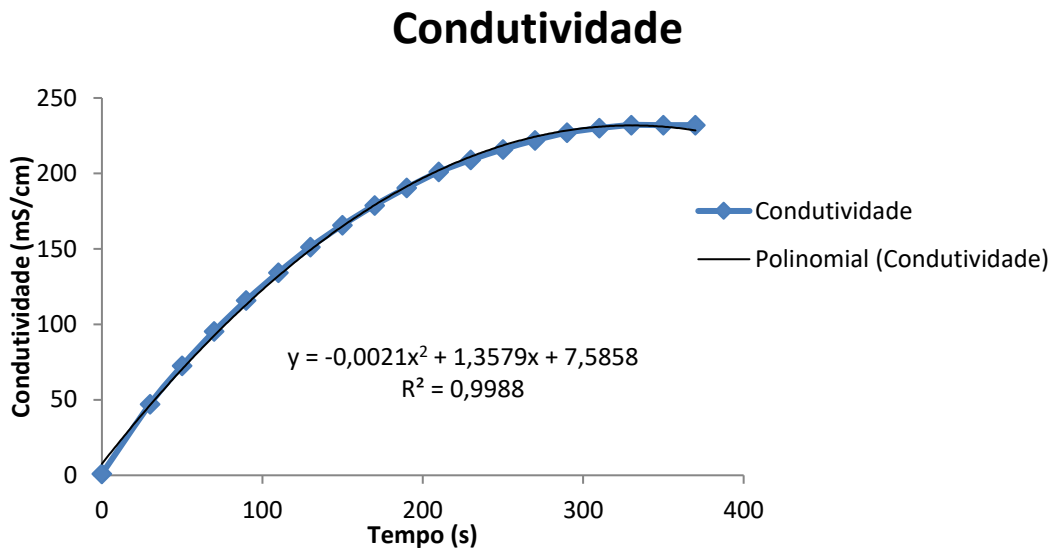


Figura 40. Curva de calibração para concentração de bentonita de 10 lb/bbl.

Cada fluido foi preparado adotando 20 minutos de agitação no Hamilton Beach e deixado em repouso por um período de 24 horas. Os testes foram iniciados adicionando 1 litro do fluido ao sistema de mistura junto com a concentração inicial de sal com o misturador ligado a 2000 RPM a 25°C.

O fluido permaneceu era agitado por 15 minutos e então se inseria a massa de sal de 85 g. Neste momento o cronômetro foi acionado e a cada 10 segundos anotava-se a condutividade até atingir 600 segundos, tempo máximo estimado para a dissolução das massas de sal. Os dados de condutividade foram transformados em concentração com a ajuda das curvas de calibração. A concentração para cada tempo foi então inserida no programa para a estimação do coeficiente global de transferência de massa.

Importante destacar que 24h foi o tempo padronizado para que a bentonita fosse hidratada e os testes foram feitos em triplicata. A massa de sal escolhida para o trabalho foi proporcional a massa de sal utilizada no trabalho de Meneses (2016).

O número de Reynolds do sistema agitado foi determinado utilizando a Equação 14.

$$Re_{tq} = \frac{D^2 N \rho_f}{\mu_{ap}} = \frac{D \rho_f}{k \beta^{n-1} N^{n-2}} \quad (14)$$

Onde D é o diâmetro do impelidor, ρ_f é a massa específica do fluido, β é o parâmetro de forma da hélice (hélice naval - 10), k e n representam os parâmetros do modelo da potência, N é a rotação do impelidor, Re_{tq} é o número de Reynolds para tanque agitado e μ_{ap} é a viscosidade aparente do fluido.

3.5 Abordagem Matemática

A modelagem matemática aplicada neste trabalho, foi semelhante a de Meneses (2016) e todos os detalhes da modelagem podem ser obtidos no referido trabalho. Serão apresentadas aqui, apenas as equações principais do modelo. Estas foram obtidas tendo como base a conservação de massa para as fases líquidas e sólidas do processo. O sistema é constituído por duas equações diferenciais parciais (EDP's) representando a fase líquida (Equação 15) e sólida (Equação 16) do processo de dissolução.

A partir das EDP's é possível identificar as transições na concentração de NaCl no fluido (C) e a fração volumétrica dos sólidos (ε_s) ao longo do espaço e do tempo. Essas mudanças ocorrem durante todo o processo dissolutivo das partículas de sal.

$$(15) \quad \frac{\partial}{\partial t} C(z, t) + v_z \left(\frac{\partial}{\partial z} C(z, t) \right) = k. a. (C^* - C(z, t))$$

C.I., $C(z, 0) = C_f$
C.C., $C(0, t) = C_f$

$$(16) \quad \rho_s \left(\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_s(z, t) + v_z \left(\frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_s(z, t) \right) \right) = -k. a. (C^* - C(z, t))$$

C.I., $\varepsilon_s(z, 0) = \varepsilon_{s0}$,
C.C., $\varepsilon_s(0, t) = \varepsilon_{s0}$

Onde, C é a concentração de sal no fluido variando com o espaço e o tempo, K é o coeficiente global de transferência de massa, a é a área específica da transferência de massa. Na Equação 16 ρ_s é a massa específica do cloreto de sódio, ε_s é a fração volumétrica das partículas sólidas variando com o espaço e o tempo.

O sinal negativo na equação da fase sólida representa a direção do fluxo mássico durante a dissolução. O coeficiente de transferência de massa K define a taxa com que os íons deixam os cristais dos sais e migram para a solução, uma vez que o fenômeno de dissolução ocorre após haver a dissociação dos sais em que o fluxo mássico ocorre da fase sólida para a fase líquida.

Algumas hipóteses foram adotadas no trabalho de Meneses (2016) e serão também utilizadas neste trabalho quais sejam:

- ✓ Escoamento em duas fases: Fase líquida – suspensão de água, bentonita e NaCl dissolvido; Fase sólida – partículas de NaCl;
- ✓ Regime plenamente turbulento com velocidade média constante;
- ✓ Regime transiente;
- ✓ Concentração de saturação constante para a mesma suspensão;
- ✓ Sistema isotérmico;
- ✓ Fluido incompressível;

A área específica da transferência de massa é a área superficial disponível para a ocorrência da transferência de massa (dissolução de sal) por unidade de volume e é representada pela (Equação 17).

$$a = \frac{6 \cdot \varepsilon_s(t)}{\bar{D}_p} \quad (17)$$

Onde ε_s é a fração volumétrica de sólidos em função do tempo, \bar{D}_p é o diâmetro médio de partículas de sal que é dado pelo diâmetro médio de Sauter, encontrado pela Equação 18 (PEÇANHA, 2014).

$$\bar{D}_p = \frac{1}{\int_0^1 \frac{dy}{\bar{D}_p}} \quad (18)$$

Onde x é a fração mássica de sal menor que um dado tamanho.

No presente trabalho, foi utilizado um aparato experimental que representa um tanque de mistura perfeita para avaliar a cinética de dissolução do sal ao longo do tempo e o termo de variação do espaço foi negligenciado nas equações. Sendo assim, a modelagem matemática utilizada passa a ser composta de três equações diferenciais ordinárias acopladas dadas a seguir.

Balanco de massa de NaCl na fase líquida:

$$\frac{dC(t)}{dt} = K \cdot a \cdot (C^* - C(t)) \quad (19)$$

$$C.I., C(0) = C_0$$

Balanco de massa de NaCl na fase sólida:

$$\frac{d\varepsilon_s(t)}{dt} = -\frac{K \cdot a}{\rho_s} (C^* - C(t)) \quad (20)$$

$$C.I., \varepsilon_s(0) = \varepsilon_{s0}$$

Variação do diâmetro médio das partículas com o tempo:

$$\frac{d\bar{D}_p(t)}{dt} = -\frac{2 \cdot K}{\rho_s} (C^* - C(t)) \quad (21)$$

$$C.I., dp(0) = dp_0$$

Área interfacial da transferência de massa:

$$a(t) = \frac{6 \cdot \varepsilon_s(t)}{\bar{D}_p(t)} \quad (22)$$

Onde, C é a concentração de sal no fluido, C^* é a concentração de saturação, K é o coeficiente global de transferência de massa, a é a área específica de transferência de massa, t é o tempo, ε_s é fração volumétrica, ρ_s é massa específica e \bar{D}_p é diâmetro médio de Sauter.

3.6 Variáveis do processo

Para as condições iniciais utilizadas na modelagem matemática, os parâmetros essenciais para resolver o modelo estão descritos nas Tabelas 7.

Tabela 7. Variáveis utilizadas no modelo.

Descrição	Parâmetros	Valores	Bibliografia
Concentração de saturação de NaCl em água	C^* (30°C)	315,15 g/L	Meneses (2016)
Concentração de saturação de NaCl em água com bentonita	C^* (25°C)	<ul style="list-style-type: none"> • 10 lb/bbl: 310 g/L • 15 lb/bbl: 320 g/L • 20lb/bbl: 330 g/L 	Dado experimental
Massa específica	ρ_s	2165 kg/m ³	Lide (2010)
Diâmetro médio de Sauter	\bar{D}_p	1,34 mm	Experimental
Fração volumétrica	ε_s	0,377	Calculado

A fração volumétrica utilizada para todos os testes foi de 0,377 isso porque o valor da massa de sal adicionada era de 85 g/L independente da concentração inicial de sal e da concentração de bentonita. Admitiu-se que o 1L de suspensão continha água, bentonita e o sal inicial, volume utilizado antes da incorporação do perfil ao fluido.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes de caracterização da bentonita e do sal, testes reológicos das suspensões, testes de cinética de dissolução do sal e os resultados da modelagem.

4.1 Densidades

A densidade da bentonita obtida pelo teste de picnometria realizado em triplicata, teve como resultado uma densidade média de $1,66 \text{ g/cm}^3$ e um desvio padrão de $0,03 \text{ g/cm}^3$. As densidades dos fluidos tiveram variação de 1018 a 1060 g/L.

4.2 Difração de Raios X

A técnica de difração de raios X foi utilizada para identificar os componentes presentes na bentonita. A Figura 41 apresenta o difratograma da amostra de bentonita M-200. Nota-se a presença de quartzo, montmorilonita, caulinita (TONNESEN *et al.*, 2012). A presença desses componentes confirmam que trata-se de uma bentonita (CAENN *et al.*, 2014).

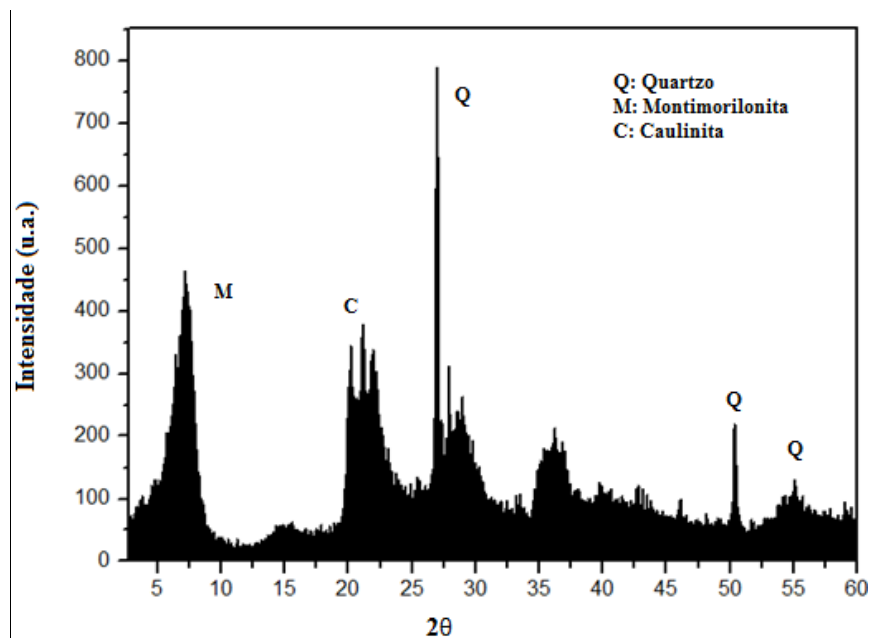


Figura 41. Difratograma de Raios X

4.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica da bentonita e do sal foi determinada no Malvern Mastersizer 2000. Antes de realizar a análise do sal, o mesmo passou pelo agitador eletromagnético e pelo quarteamento, utilizando a técnica de pilhas cônicas objetivando

selecionar uma faixa granulométrica e para devida homogeneização. A Figura 42 mostra o resultado da análise do sal, e indica o intervalo de tamanho entre 724-2187 μm , e o diâmetro médio de Sauter de 1,34 mm (provisto pelo *software*).

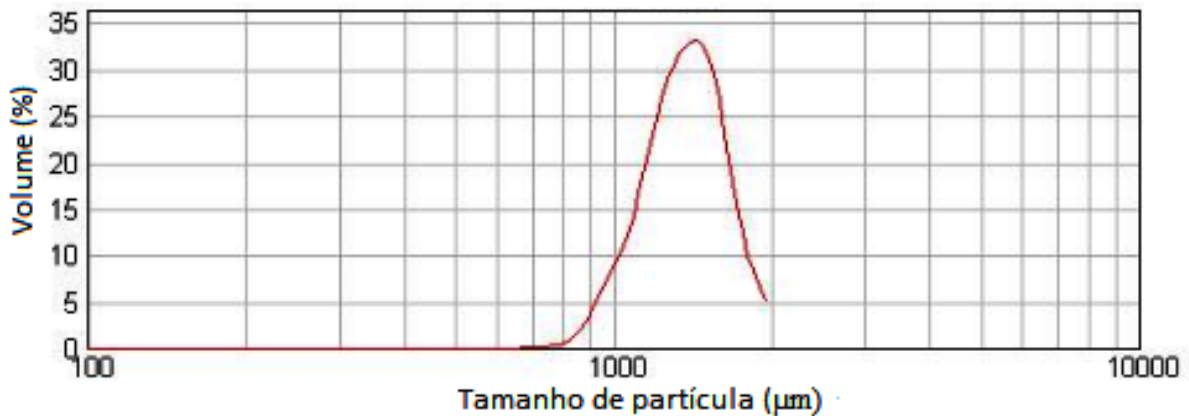


Figura 42: Análise granulométrica do sal

Cerca de 10% das partículas de sal possuem diâmetro médio de 1,07 mm, 50% possuem diâmetro médio de 1,38 mm e 90% apresentam diâmetro médio de 1,69 mm, de acordo com dados fornecidos pelo equipamento.

A Figura 43 apresenta a análise granulométrica da bentonita que tem como característica grãos muito finos. O intervalo de tamanho é de 0,55-120,22 μm , e o diâmetro médio de Sauter de 0,011 mm (provisto pelo *software*).

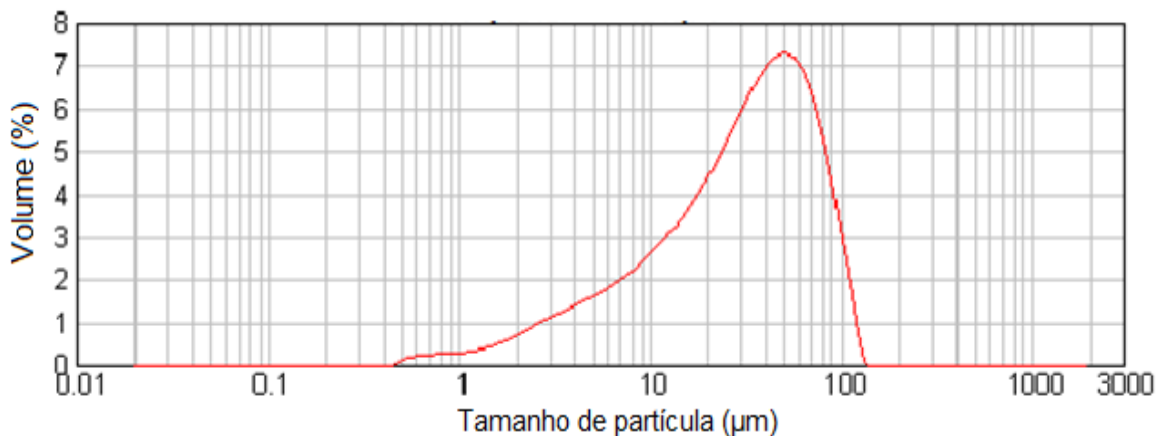


Figura 43: Análise granulométrica da bentonita.

Já para a bentonita, cerca de 10% possuem diâmetro médio de 0,005 mm, 50% possuem 0,031 mm e 90% possuem 0,078 mm.

Para análise da bentonita utilizou-se o álcool, pelo fato da argila expandir na presença de água. Enquanto que para o sal utilizou-se a parafina.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

O resultado obtido pela microscopia eletrônica de varredura apresenta resultados da análise do grão da bentonita. A caracterização por MEV da bentonita apresenta aglomerados de tamanhos heterogêneos com aspecto poroso, como mostra a Figura 44.

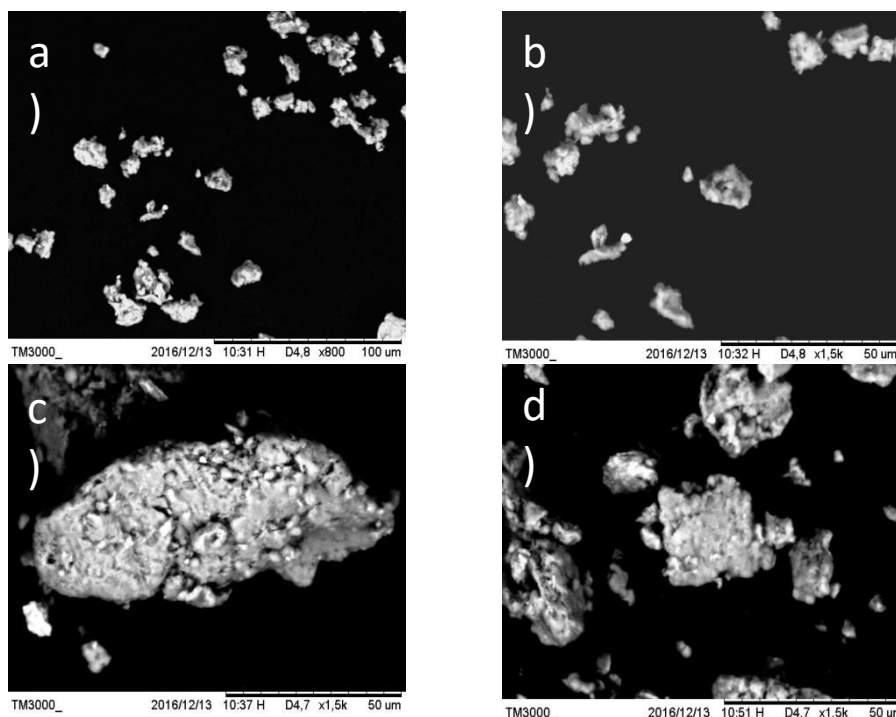


Figura 44. Micrografia obtida a partir a) ampliação 100x, b) ampliação 800x, c) e d) ampliação 1500x da bentonita.

4.5 Teste de inchamento

O teste de inchamento realizado por 7 dias, mostrou aumento no volume da bentonita de cerca de 140%. A Figura 45 apresenta resultados de inchamento na célula 1 e 2, pois o experimento foi realizado em duplicata. Nota-se que as curvas são semelhantes comprovando a reprodutibilidade do resultado.

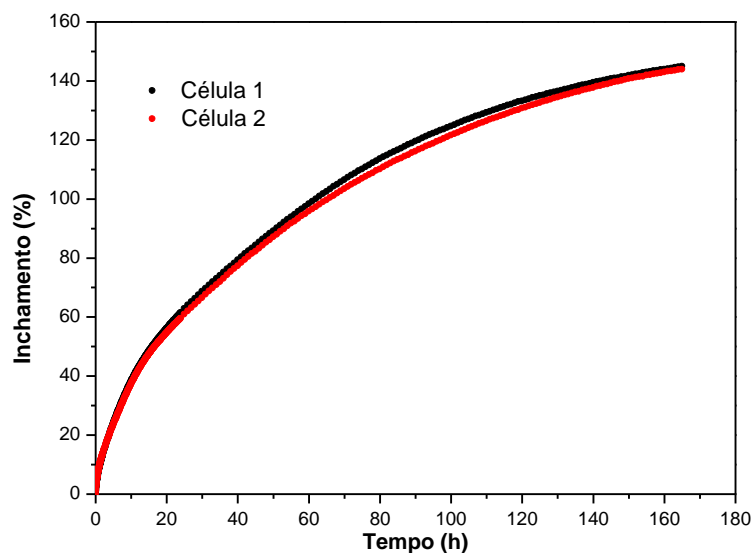


Figura 45. Teste de inchamento.

Não observou-se estabilização da curva de inchamento para 7 dias de análise. O aumento do volume devido ao inchamento é relatado em trabalhos da literatura como SILVA (2011) para diferentes tipos de bentonita sódica, sendo que quanto maior é a presença do

sódio em sua composição, maior é o inchamento. Podendo formar dupla camada difusa à medida que a água é adsorvida pelas lamelas (CAENN *et al.*, 2014).

4.6 Área Superficial Específica

A área superficial específica obtida foi de 102,21 m²/g e o volume dos poros foi de 0,019 cm³/g.

A área específica apresentada pela bentonita explica a grande capacidade de absorção de água que provoca o seu inchamento e conseqüentemente o aumento da viscosidade aparente devido à formação da dupla camada difusa. Segundo Caenn *et al.* (2014), quanto maior a subdivisão do sólido, maior é a área que esse sólido tem para interagir, ou seja, maiores serão os fenômenos de superfície.

4.7 Experimentos Reológicos

Os testes reológicos realizados tiveram objetivo de caracterizar o comportamento da bentonita na ausência e presença de cloreto de sódio. Além disso, avalia o impacto da concentração de bentonita, concentração do sal e do tempo de hidratação nos parâmetros reológicos, permitindo a compreensão da modificação das propriedades no fluido na presença desses materiais.

4.7.1 Efeito do tempo para fluidos com a ausência de sal

Os dados apresentados nas Figuras 46, 47 e 48 (a) mostram as curvas de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e os 46, 47 e 48 (b) apresentam os resultados de viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para fluido preparado com 10, 15 e 20 lb/bbl respectivamente sem a presença de sal.

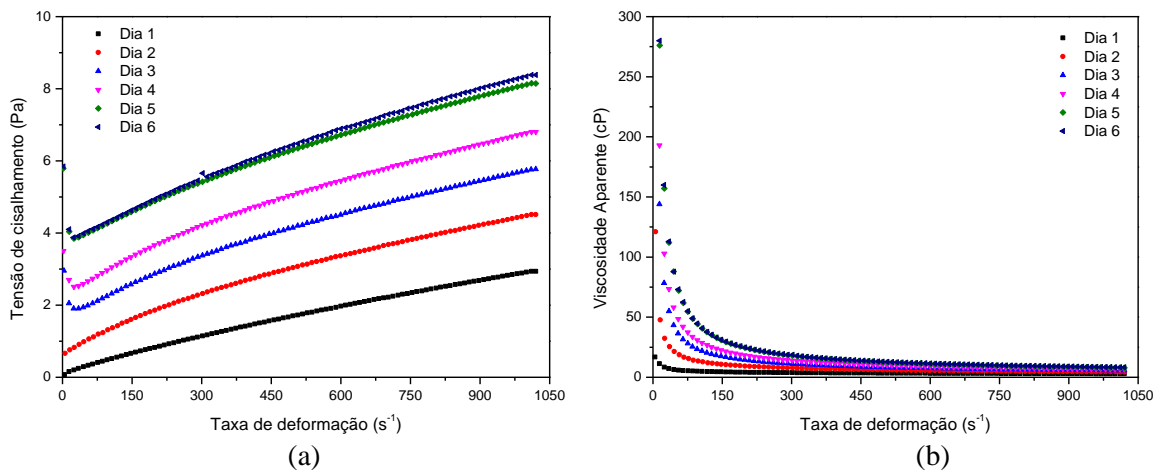


Figura 46. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), fluido com 10 lb/bbl de bentonita.

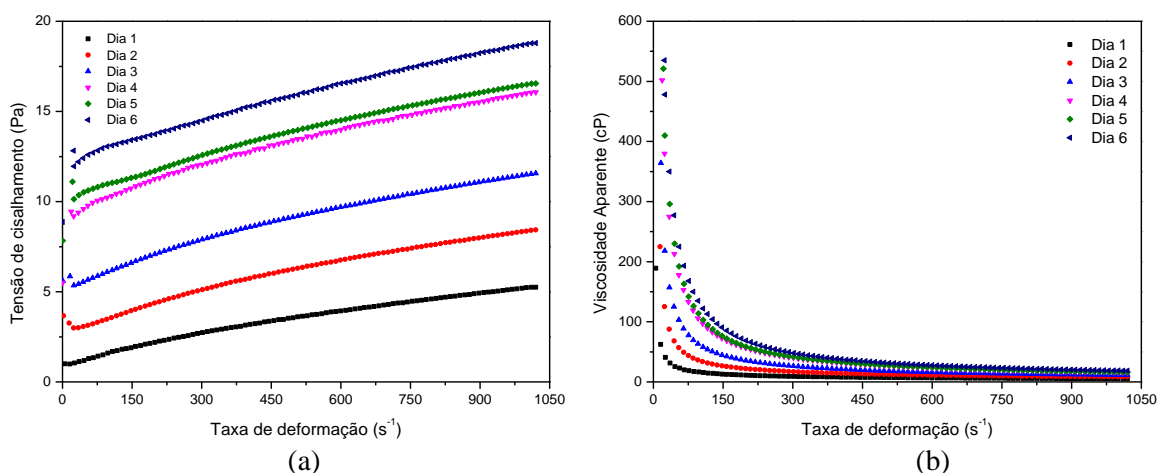


Figura 47. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), fluido com 15 lb/bbl de bentonita.

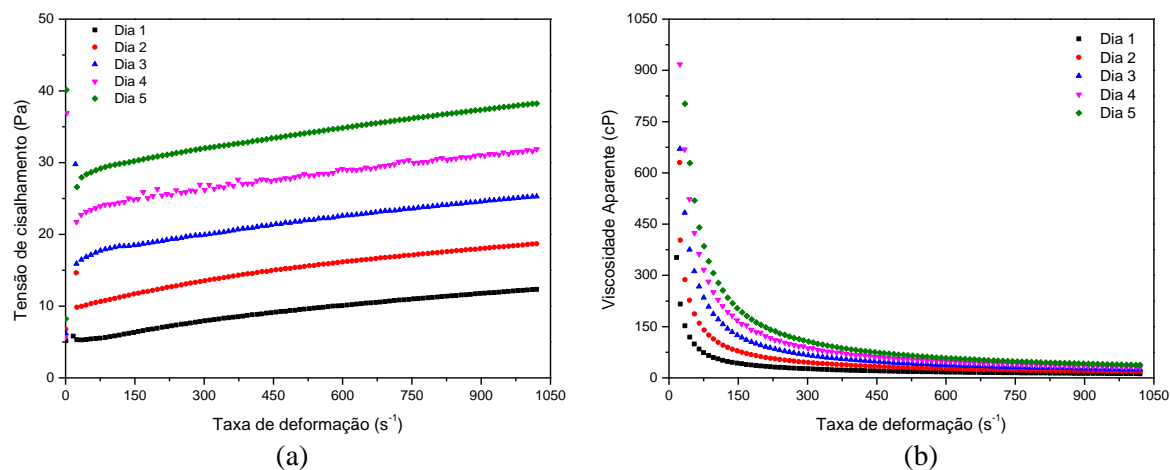


Figura 48. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), fluido com 20 lb/bbl de bentonita.

Avaliando as Figuras 46, 47 e 48 (a) e (b) é possível perceber que o tempo é um fator que influencia fortemente o comportamento reológico da suspensão, sendo que quanto maior o tempo de hidratação da bentonita, maior é a tensão de cisalhamento e viscosidade aparente para dadas taxas de deformação e para todas as concentrações estudadas. Esse comportamento está relacionado com a hidratação da bentonita, ocasionada pela entrada de água entre as lamelas da montmorilonita (dupla camada difusa), essa hidratação provoca aumento da viscosidade aparente ao longo do tempo. Para os testes de inchamento, 7 dias não foi suficiente para haver completa hidratação, no caso dos testes reológicos, o tempo admitido para as análises foi de 6 dias, devido a grande viscosidade que as suspensões adquirem para tempo superior. O sexto dia para a concentração de 20 lb/bbl não foi feito devido à alta viscosidade da suspensão que ocasionou leituras imprecisas do equipamento. Esse fenômeno que ocorreu nos dois testes confirmam que a hidratação completa dessa bentonita é superior a 7 dias.

Melo (2008), realizando testes semelhantes com a bentonita, com o tempo 0 a 72 horas de hidratação, também observou que quanto maior o tempo de hidratação, maior é a viscosidade aparente, um comportamento já esperando para esse tipo de material. Abu-Jedail

(2011) também avaliou a reologia de bentonitas cálcicas e sódicas com o efeito do tempo e da adição de eletrólitos. O autor observou a mesma relação, ou seja, o aumento da concentração de bentonita provoca aumento da viscosidade aparente devido a formação de uma estrutura que dificulta o fluxo do fluido.

4.7.2 Efeito do tempo na reologia para fluidos com a presença de sal

Os resultados a seguir se referem a fluidos com concentração fixa de 10, 15 e 20 lb/bbl de bentonita respectivamente com variação na concentração de sal de 32, 96 e 180 g/L para 6 dias de experimentos, posterior a apresentação dos resultados, os mesmos serão discutidos.

As Figuras 49, 50 e 51 (a) apresentam os resultados de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e as Figuras 49, 50 e 51 (b) exprimem os resultados de viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para fluidos preparados com 10 lb/bbl de bentonita, variando as concentrações de sal.

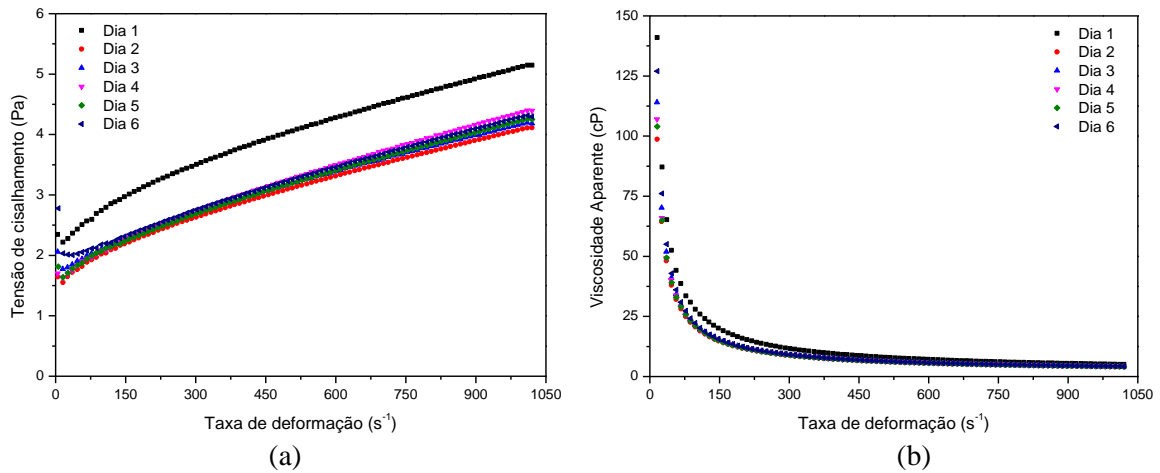


Figura 49. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 10 lb/bbl de bentonita com 32 g/L de sal.

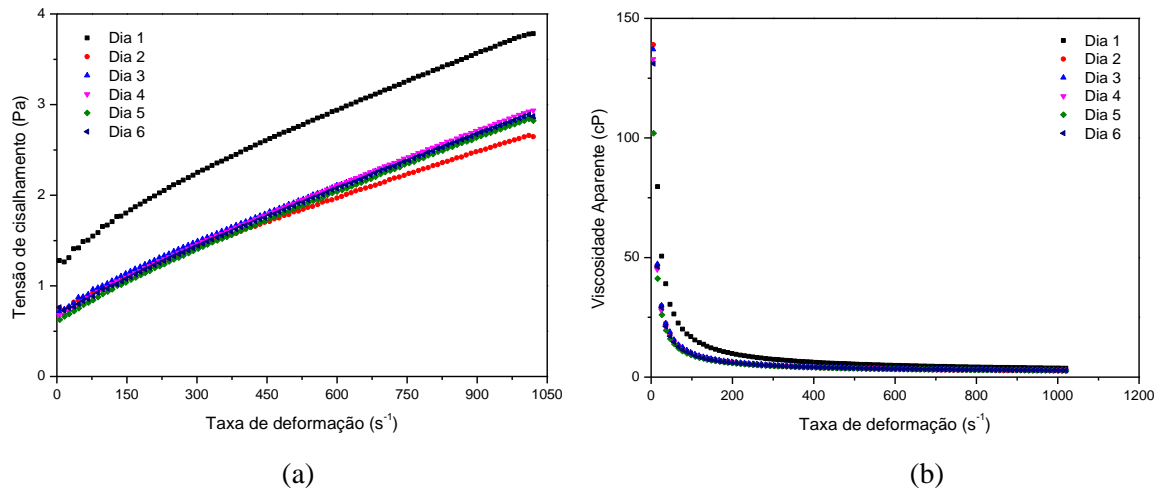


Figura 50. Avaliação do efeito do tempo na reologia, , tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 10 lb/bbl de bentonita com 96 g/L de sal.

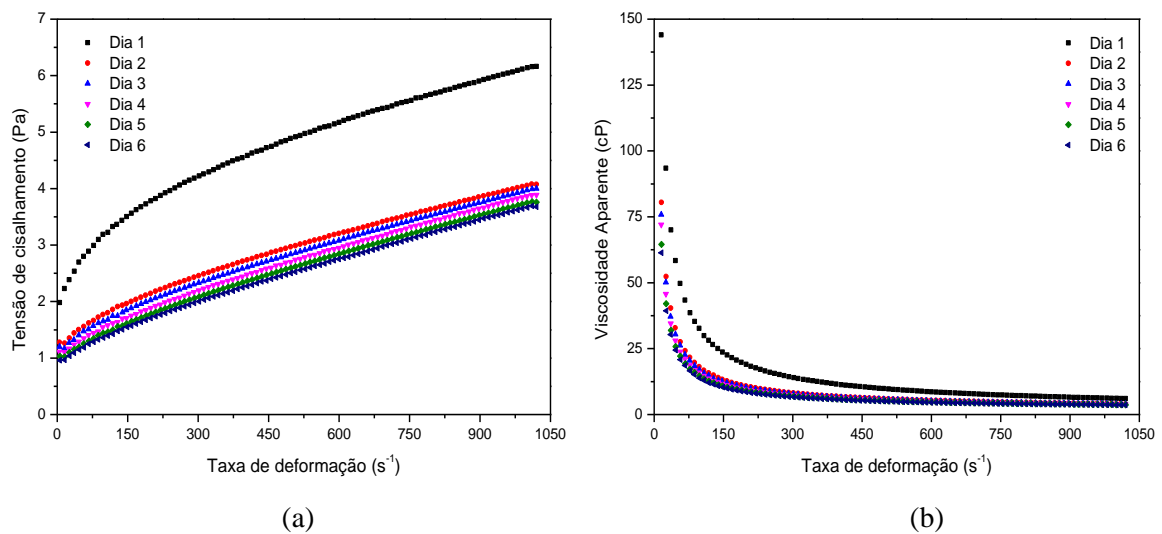


Figura 51. Avaliação do efeito do tempo na reologia, , tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 10 lb/bbl de bentonita com 180 g/L de sal.

As Figuras 52, 53 e 54 (a) apresentam os resultados de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e os 52, 53 e 54 (b) apresentam os resultados de viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para fluidos preparados com 15 lb/bbl de bentonita variando as concentrações de sal em 32, 96 e 180 g/L respectivamente. Possibilitando avaliar o efeito do tempo de hidratação na reologia do fluido.

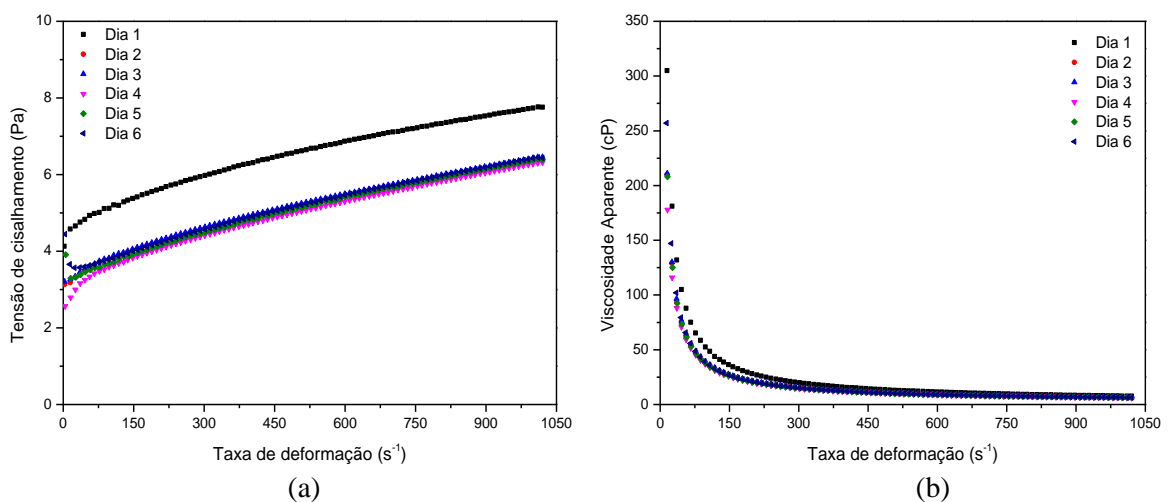


Figura 52. Avaliação do efeito do tempo na reologia, , tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 15 lb/bbl de bentonita com 32 g/L de sal.

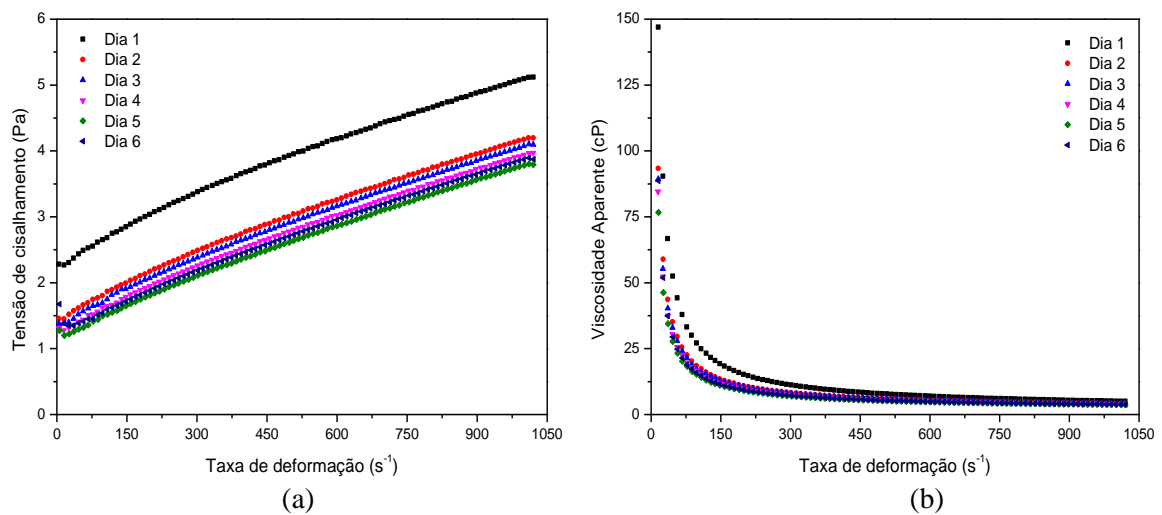


Figura 53. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 15 lb/bbl de bentonita com 96 g/L de sal.

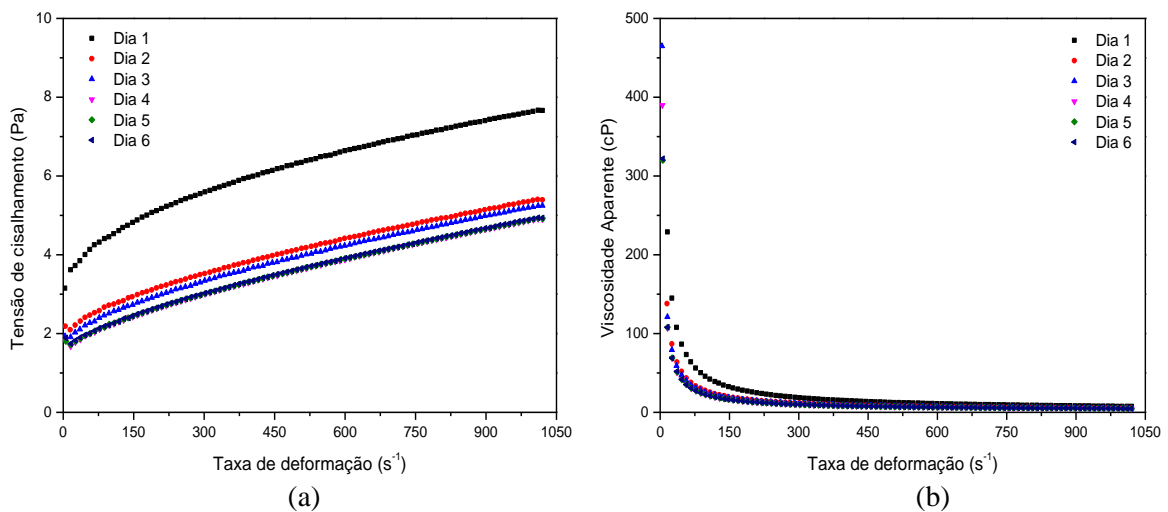


Figura 54. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 15 lb/bbl de bentonita e 180 g/L de sal.

As Figuras 55, 56 e 57 (a) apresentam os resultados de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e os 55, 56 e 57 (b) apresentam os resultados de viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para fluidos preparados com 20 lb/bbl, variando as concentrações de sal em 32, 96 e 180 g/L. Tendo como objetivo a avaliação do tempo de hidratação na reologia do fluido com a presença do eletrólito.

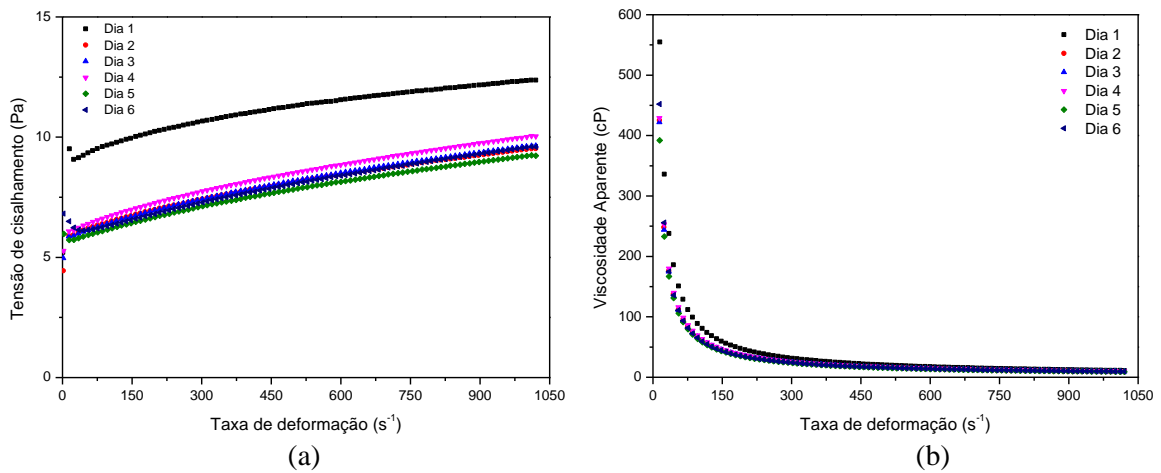


Figura 55: Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 20 lb/bbl de bentonita com 32 g/L de sal.

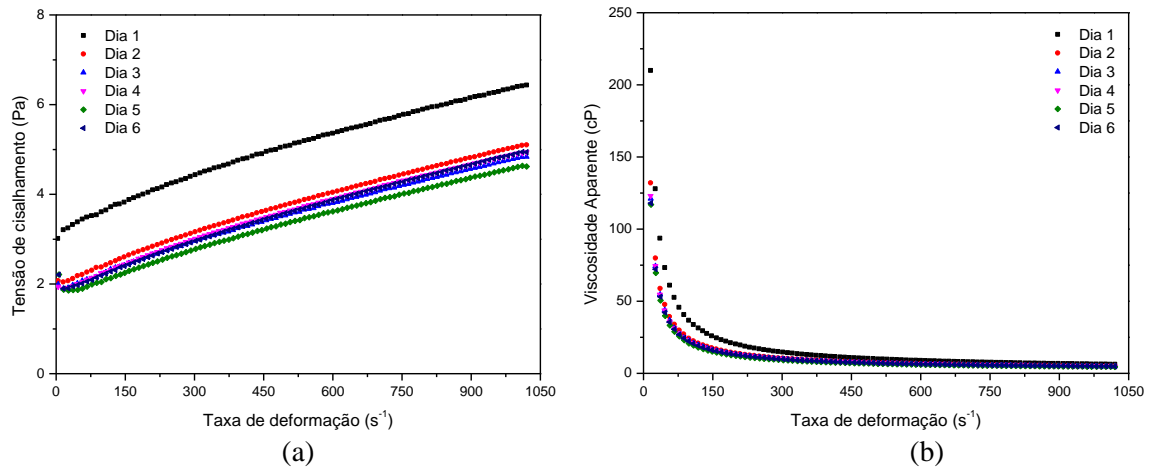


Figura 56. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 20 lb/bbl de bentonita com 96 g/L de sal.

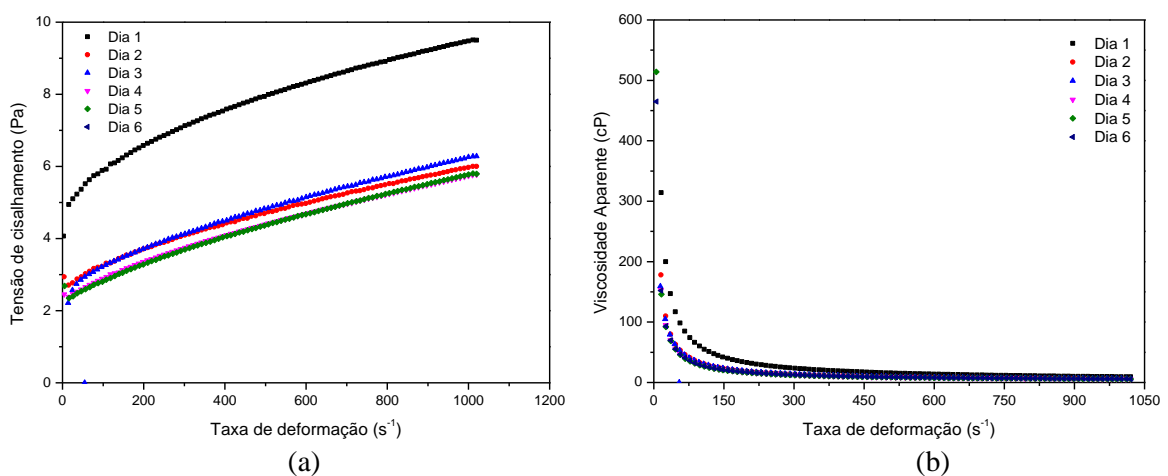


Figura 57: Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões de 20 lb/bbl de bentonita com 180 g/L de sal.

Em todos os casos, verifica-se o decréscimo da viscosidade aparente, isto ocorre em virtude da adição de sal, comportamento também observado por Kelessids *et al.* (2007). Esse comportamento é ocasionado principalmente pela interação de atração entre as lamelas que o sal proporciona (ALI E BANDYOPADYAY, 2015). Essa atração ocasiona a agregação, provocando decréscimo na viscosidade aparente, porque as lamelas se unem e a área superficial disponível para interagir com o meio torna-se menor (CAENN *et al.*, 2014).

É possível afirmar ainda que a partir do segundo dia de experimentos as curvas reológicas para a concentração de 10 lb/bbl estabilizam na presença de 32 g/L sal. Para concentração de 96 g/L de sal para mesma concentração de bentonita, a estabilidade acontece no terceiro dia e para concentração de 180 g/L de sal, a estabilidade parece acontecer no quinto dia. Indicando que o aumento da concentração de sal dificulta a estabilidade reológica do fluido.

Para concentração de 15 lb/bbl de bentonita e 32 g/L de sal, é possível observar que a estabilidade também ocorreu no segundo dia. Para 96 g/L as curvas são mais próximas entre o quinto e sexto dia, indicando a tendência a estabilidade. Já para concentração de 180 g/L de sal a estabilidade ocorre no quarto dia.

Para concentração de 20 lb/bbl e 32 g/L de sal a estabilidade se apresenta aparentemente no quinto dia. Para concentração de 96 g/L as curvas apresentam um certo distanciamento, no entanto, do dia 3 a 5 parece haver estabilidade. Para concentração de 180 g/L a estabilidade ocorre no quarto dia. De maneira geral, menores concentrações de sal e bentonita favoreceram a estabilidade das curvas de fluxo. Provavelmente devido a mesma interação entre a bentonita e o eletrólito.

4.7.3 Comparação do efeito da concentração de bentonita na reologia

Os resultados abaixo mostram o efeito da concentração de bentonita na reologia dos fluidos nas concentrações de 10 lb/bbl, 15 lb/bbl, 20 lb/bbl para as concentrações de sal de 0, 32, 96 e 180 g/L. Resultados referentes ao segundo dia de testes. Fixou-se o segundo dia de teste para comparação como padronização. Os resultados para os demais dias estão apresentados no anexo. As Figuras 58, 59, 60 e 61(a) apresentam os resultados de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e os 58, 59, 60 e 61 (b) apresentam os resultados de viscosidade aparente *versus* taxa de deformação.

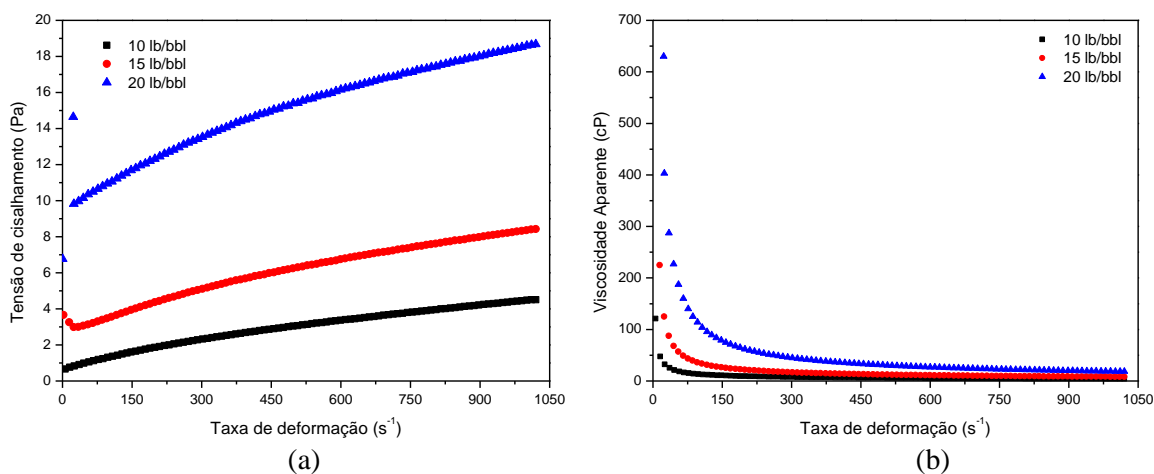


Figura 58. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), com 0 g/L de sal.

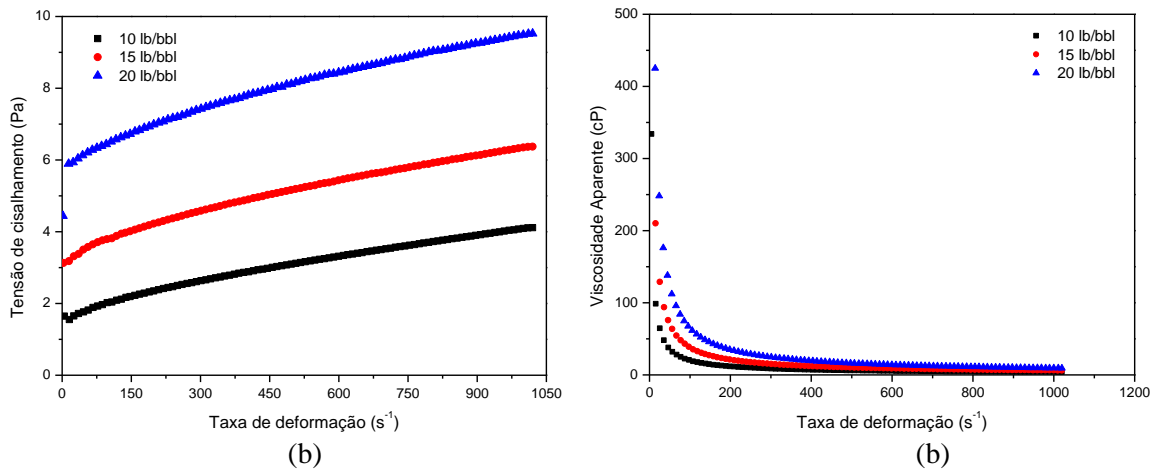


Figura 59. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), com 32 g/L de sal.

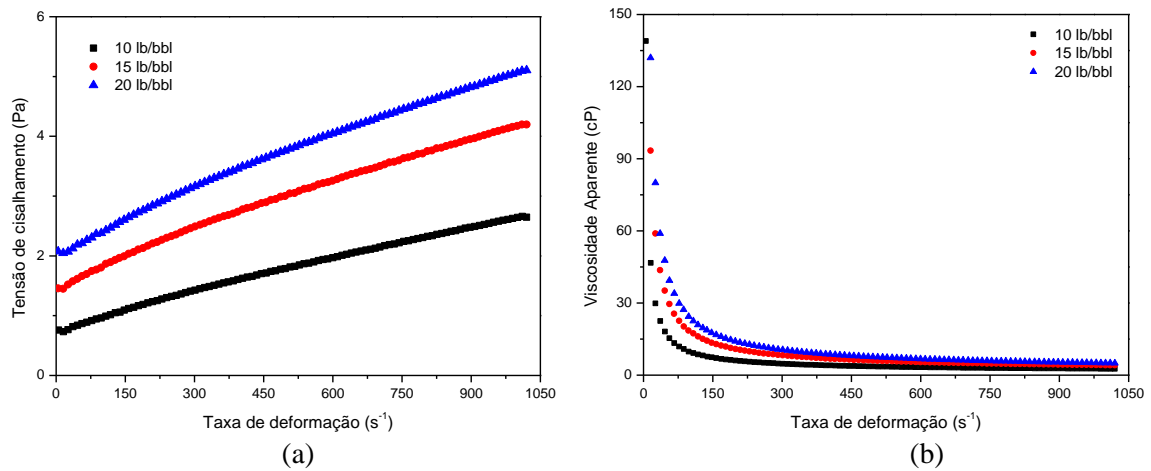


Figura 60. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), com 96 g/L de sal

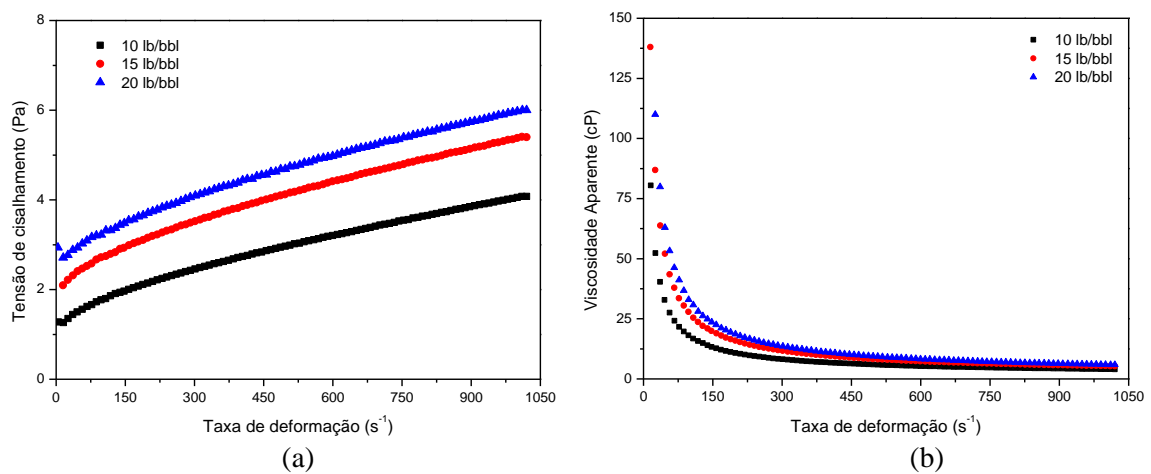


Figura 61. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), com 180 g/L de sal.

De acordo com os gráficos apresentados é possível perceber claramente que maiores concentrações de bentonita ocasionam maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente independente da concentração de sal. Duman e Tunç (2009) estudaram as propriedades eletrocinéticas e reológicas da bentonita sódica na presença de eletrólitos e os estudos apontaram que o aumento da concentração de bentonita faz aumentar a viscosidade aparente do fluido, resultado semelhante ao encontrado neste estudo.

Os fluidos preparados sem o sal são os que apresentam maiores valores de viscosidade aparente para uma dada taxa de deformação. Isso ocorre porque quando a bentonita está suspensa em água pura ela não pode se aglomerar devido à dupla camada difusa que está presente entre as lamelas. A dupla camada acontece à medida que a água adsorvida interage em toda área superficial separando as lamelas que resulta no inchamento da argila.

Já a redução da viscosidade na presença de eletrólito é atribuída por Nitawaki *et al.* (1981) a compressão da dupla camada difusa.

Verifica-se também que as curvas reológicas em presença de sal apresentam menores valores de viscosidade aparente quanto maior a concentração de sal de 0 a 96 g/L e o comportamento inverso ocorre para a concentração de 180 g/L, fenômeno que será discutido no próximo item.

4.7.4 Efeito da concentração de sal

Os resultados abaixo mostram o efeito da concentração de sal na reologia dos fluidos nas concentrações de 10 lb/bbl, 15 lb/bbl, 20 lb/bbl para as concentrações de sal de 0 g/L, 32g/L, 96 g/L 180 g/L. Resultados referentes ao segundo dia de testes.

As Figuras 62, 63 e 64 (a) apresentam os resultados de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e os 62, 63 e 64 (b) apresentam os resultados de viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para o fluido preparado com 10 lb/bbl.

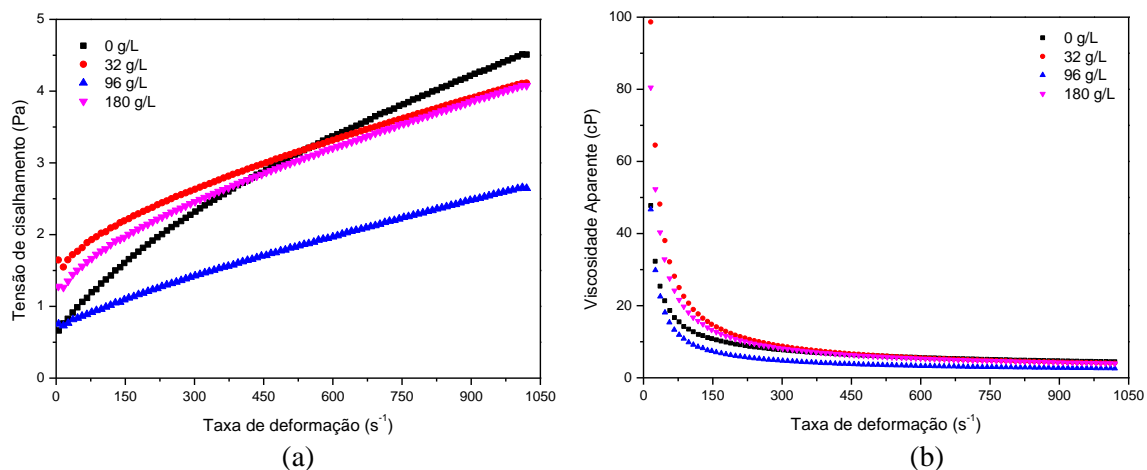


Figura 62. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões com 10 lb/bbl de bentonita e diferentes concentrações de NaCl.

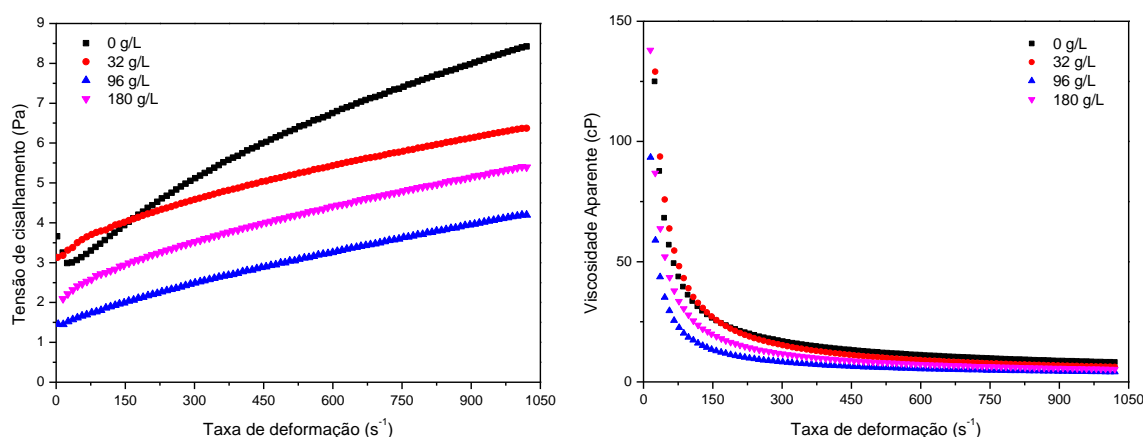


Figura 63. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita.

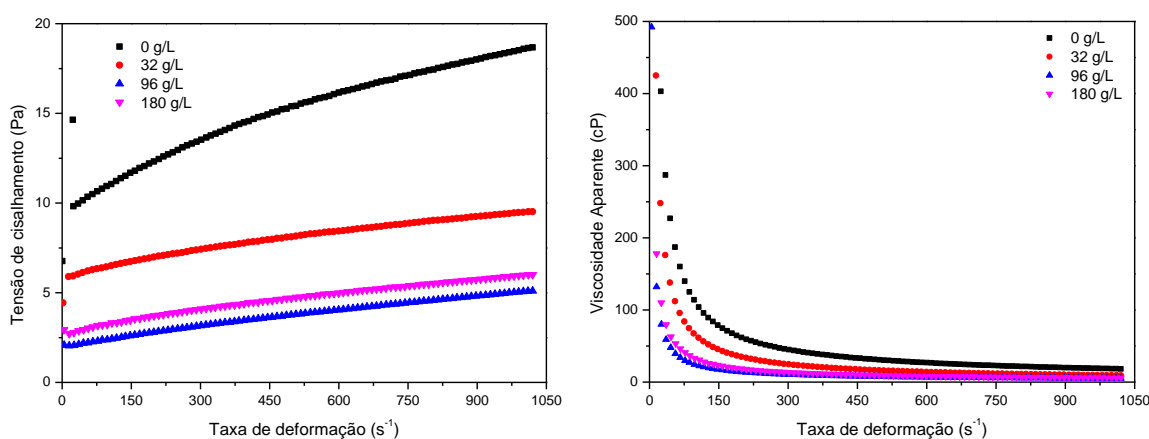


Figura 64. Avaliação do efeito do tempo na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação (a), viscosidade aparente *versus* taxa de deformação (b), para suspensões com 20 lb/bbl de bentonita.

Nas Figuras 62, 63 e 64, observa-se comportamento atípico da curva de fluxo para a concentração de 180 g/L de sal. Percebe-se que há uma redução da tensão de cisalhamento e viscosidade aparente a medida que aumenta-se a concentração de sal de 0 a 96 g/L. Entretanto, para concentração de 180 g/L esse comportamento se inverteu e a tensão de cisalhamento e viscosidade aparente voltaram a subir. Esse comportamento é justificado segundo Ali e Bandyopadhyay (2015) pela alteração morfológica da microestrutura da dispersão.

O comportamento do decréscimo da viscosidade quando o sal é adicionado é justificável pela compressão da dupla camada difusa da bentonita (Kelessids *et al.*, 2007). A compressão da dupla camada difusa ocasiona a floculação. Consequentemente exibe viscosidade aparente mais baixa (Shiroma, 2012). Em contrapartida, Nitawaki *et al.* (1981) mostraram que ocorre aumento da tensão de cisalhamento e da viscosidade aparente na presença de grandes quantidades de sal, pois a força de compressão da dupla camada é reduzida fazendo com que as partículas se desagreguem. Com isso a dupla camada fica cada vez mais distante provocando o ganho de viscosidade aparente.

Esse fenômeno também foi observado por Yildiz *et al.* (1999) concluíram que os parâmetros como viscosidade aparente, tixotropia e limite de escoamento caem com a adição

de sal se comparado a ausência de sal para esses fluidos e que adicionando-se maiores quantidades de sal esses parâmetros sofrem aumento por causa da coagulação e formação de redes tridimensionais.

4.8 Experimentos de cinética

Os testes foram realizados conforme descritos nos materiais e métodos e dados das triplicatas das concentrações obtidas experimentalmente estão demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados das triplicatas dos fluidos preparados com 10 lb/bbl de bentonita e 32 g/L de sal.

Tempo (s)	Experimento 1 (g/L)	Experimento 2 (g/L)	Experimento 3 (g/L)	Média (g/L)
0	33,65	37,62	34,80	35,36 ± 2,04
10	66,59	68,27	63,28	66,05 ± 2,54
20	84,67	86,57	84,37	85,20 ± 1,19
30	96,22	95,49	91,86	94,52 ± 2,34
40	106,19	103,79	99,92	103,30 ± 3,16
50	110,96	106,52	108,39	108,62 ± 2,23
60	113,21	111,18	110,51	111,63 ± 1,41
70	114,23	112,42	111,74	112,80 ± 1,29
80	115,72	112,98	111,97	113,56 ± 1,94
90	116,18	113,66	112,31	114,05 ± 1,96
100	116,18	113,78	113,66	114,54 ± 1,42
110	116,75	114,12	113,89	114,92 ± 1,59
120	117,22	113,89	114,58	115,23 ± 1,76
200	116,75	114,46	114,58	115,26 ± 1,29
300	116,75	113,89	114,12	114,92 ± 1,59
400	116,75	115,49	116,06	116,10 ± 0,63
500	116,75	114,80	116,75	116,10 ± 1,12
600	116,75	115,38	116,98	116,37 ± 0,87

Os resultados da Tabela 8 mostram as triplicatas até 600 segundos que é o tempo adotado para a realização dos testes. É possível perceber que a dissolução ocorre de modo mais efetivo nos primeiros segundos de teste. Isso porque a medida que a dissolução ocorre, o número de partículas de sal em solução decresce provocando redução na área de transferência de massa (MENESES, 2016). Além disso, o aumento da concentração de sal em suspensão diminui a força motriz do processo de dissolução.

A partir dos dados da Tabela 8 é possível perceber que o maior desvio padrão de 2,54 na medida de tempo de 10 s, representa um erro percentual de menos de 6%, o que mostra que a metodologia adotada é adequada. Foi escolhida apenas um dos experimentos para representar, porque há semelhança nos demais. Verifica-se pela Tabela 8 que os desvios são maiores nos primeiros 60 s de experimento, quando ainda existem muitas partículas em suspensão.

Os números de Reynolds calculado para os testes de cinética para o fluido de menor e maior viscosidade foram de 266.621,93 e 134.368,57 respectivamente.

4.8.1 Perfis de concentração *versus* tempo

4.8.1.1 Resultados fixando a concentração de sal

As Figuras 65, 66 e 67 mostram os resultados experimentais de concentração *versus* tempo para os fluidos preparados com 32, 96 e 180 g/L de sal respectivamente, em diferentes concentrações de bentonita.

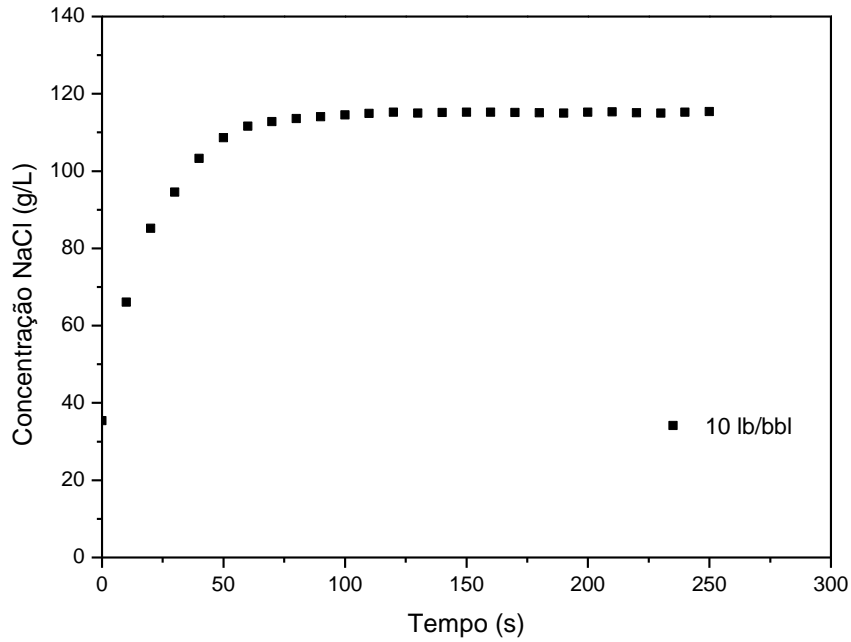


Figura 65. Perfis de concentração *versus* tempo, fixando a concentração inicial de sal em 32 g/L.

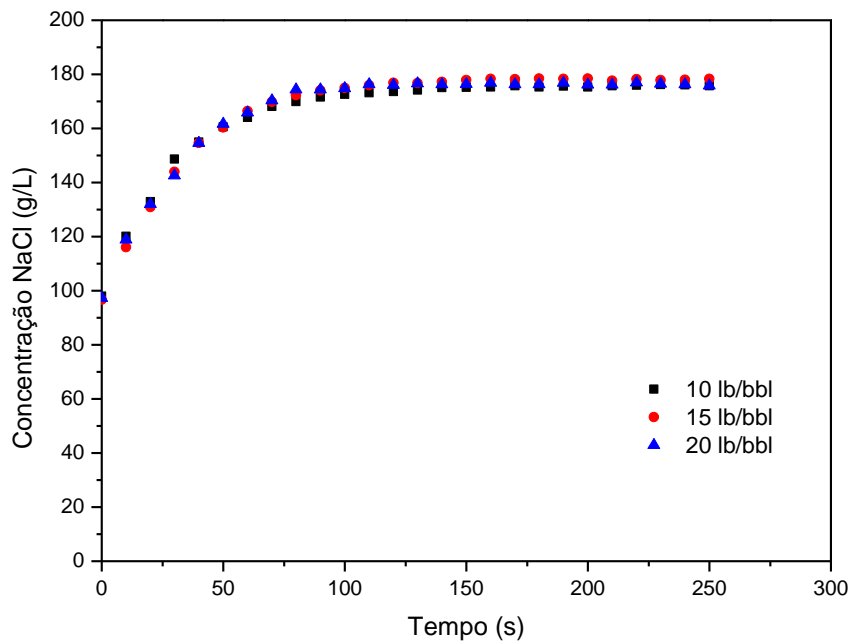


Figura 66. Perfis de concentração *versus* tempo, fixando a concentração inicial de sal em 96 g/L.

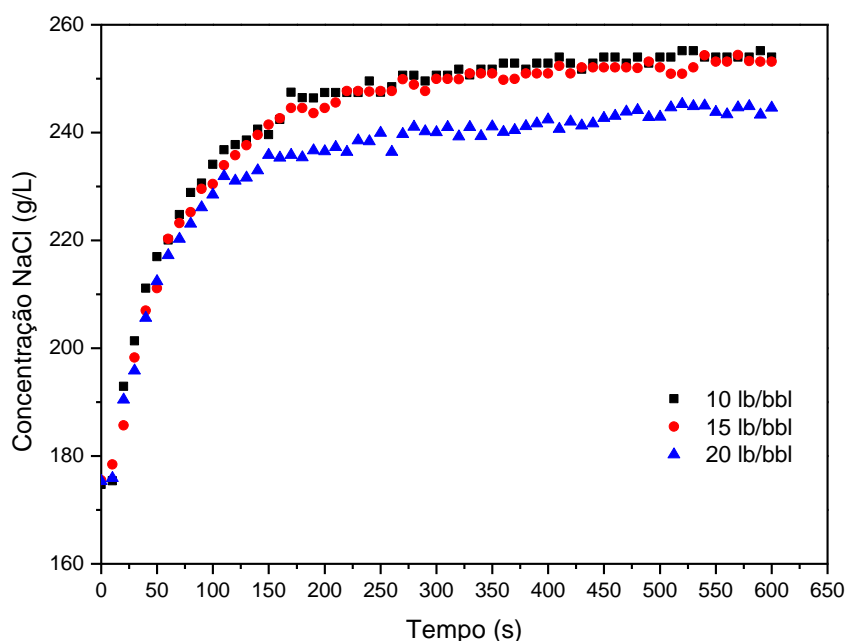


Figura 67. Perfis de concentração *versus* tempo, fixando a concentração inicial de sal em 180 g/L.

Graficamente é possível observar que a dissolução do NaCl ocorre mais rápida nos primeiros 100 segundos de experimento. Atribui-se o comportamento da dissolução ocorrer rapidamente nos primeiros segundos, à massa de sal que reduz à medida que a dissolução acontece, provocando a diminuição de partículas na suspensão. A dissolução do sal sofre influência da concentração de bentonita, porque quanto maior a concentração de bentonita mais lenta será a dissolução.

Para concentração de 32 g/L de sal (Figura 65), não foi possível realizar os testes de cinética para as concentrações de 15 e 20 lb/bbl de bentonita. Isso ocorreu porque nessas concentrações a viscosidade das suspensões é muito elevada prejudicando a homogeneização do sistema.

Para 96 g/L de sal o efeito da presença da bentonita não apresenta grande influência na dissolução de sal, embora as viscosidades aparentes das suspensões sejam muito diferentes (Figura 60). Já para a concentração de 180 g/L, a dissolução do sal é mais lenta e o efeito da presença da bentonita torna-se mais significativa podendo ser percebido pelos maiores descios nas curvas.

4.8.1.2 Resultados fixando a concentração de bentonita

Os resultados foram gerados fixando a concentração de bentonita e variando a concentração de sal em 32 g/L, 96 g/L e 180 g/L.

As Figuras 68, 69 e 70 mostram os resultados experimentais de concentração *versus* tempo para os fluidos preparados com 10 lb/bbl de bentonita com diferentes concentrações de sal.

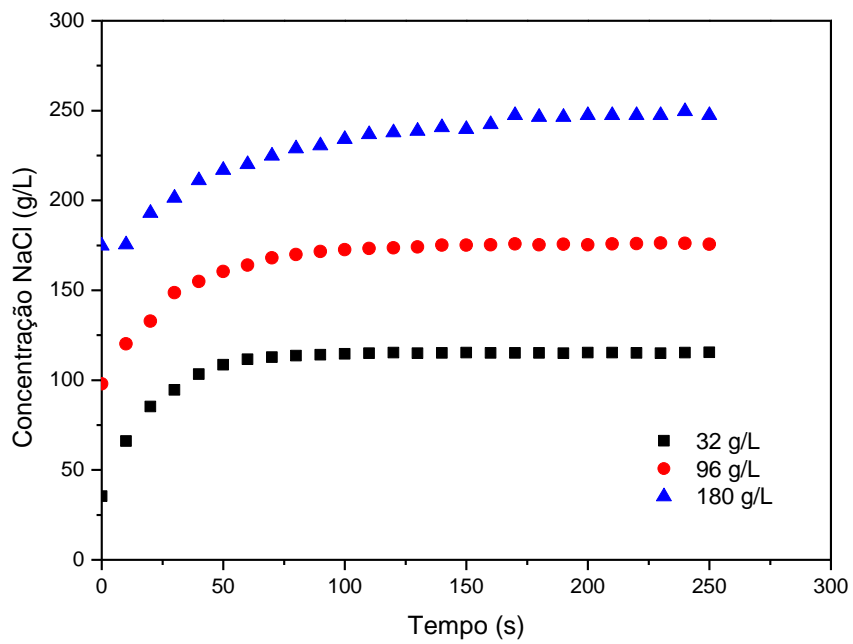


Figura 68. Perfis de concentração versus tempo, para concentração inicial de bentonita de 10 lb/bbl.

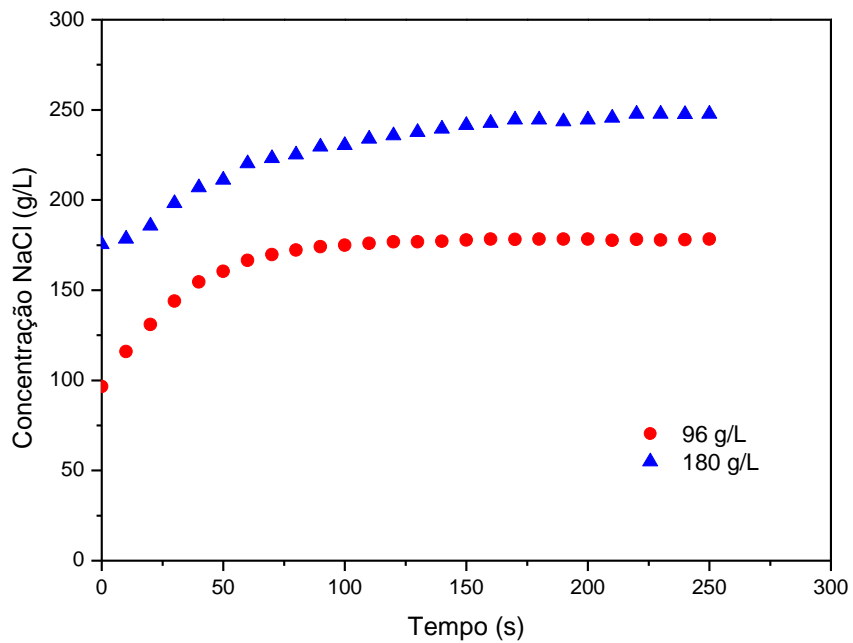


Figura 69. Perfis de concentração *versus* tempo, para concentração inicial de bentonita de 15 lb/bbl.

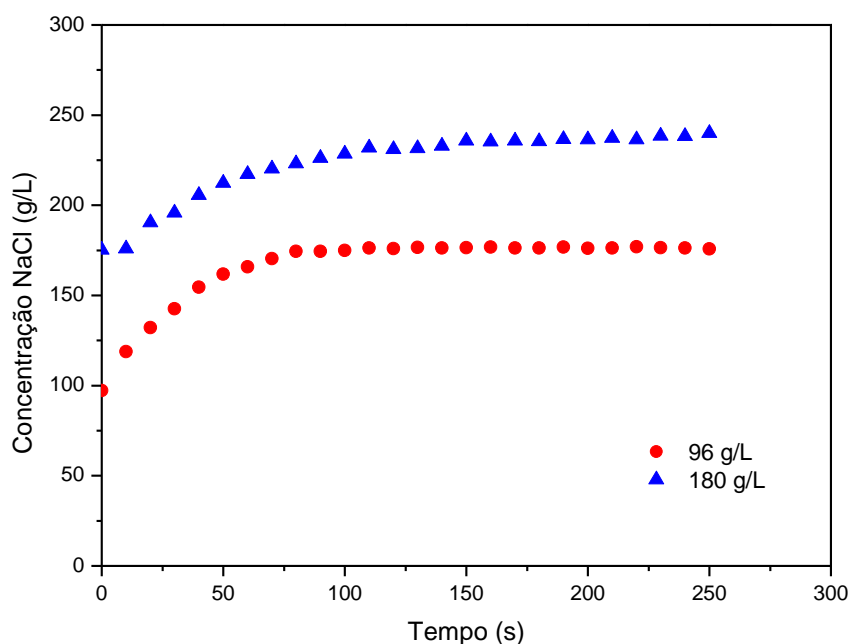


Figura 70. Perfis de concentração *versus* tempo, para concentração inicial de bentonita de 20 lb/bbl.

Pelos resultados apresentados nas Figuras 68,69 e 70 é possível observar claramente que quanto maior a concentração inicial de sal na solução, menor a velocidade de dissolução do sal em suspensão. Isso já era esperado visto que a diferença de concentração é a força motriz do processo de dissolução. Além disso, pode-se perceber que a concentração de sal na solução tem maior efeito que a variação da concentração de bentonita na dissolução do sal.

4.8.2 Coeficiente de transferência de massa

Para estimar o valor do coeficiente global de transferência de massa de cada experimento utilizou-se o pacote MAXIMA de dados. Os dados experimentais de concentração de sal e tempo obtidos foram alimentados no programa para a estimação do parâmetro. Após a convergência programa gerou arquivos de texto com os valores das variáveis medidos, calculados, o coeficiente global de transferência de massa e o erro. Na Tabela 9 são apresentados os valores estimados para o coeficiente global de transferência de massa de cada caso.

Tabela 9: Valores estimados para os coeficientes de transferência de massa.

Experimentos	C_{Bent} (lb/bbl)	C_i (NaCl)	$k \cdot 10^4$ (m/s)
1	10	32	$0,792 \pm 0,026$
2	10	96	$0,609 \pm 0,009$
3	10	180	$0,391 \pm 0,023$
4	15	32	-
5	15	96	$0,575 \pm 0,011$
6	15	180	$0,327 \pm 0,030$
7	20	32	-
8	20	96	$0,493 \pm 0,023$
9	20	180	$0,250 \pm 0,015$

Pode-se observar pela Tabela 9 que tanto a concentração de bentonita quanto a concentração inicial de sal afetam o coeficiente global de transferência de massa. Verifica-se que para uma mesma concentração de bentonita, quanto maiores as concentrações iniciais de NaCl em solução, menores os valores para os coeficientes globais de transferência de massa, ou seja, mais lenta ocorre a dissolução. Isso porque menor será a força motriz do processo de transferência de massa.

Para uma mesma concentração de sal, quanto maiores às concentrações de bentonita, menores os valores para os coeficientes globais de transferência de massa, fazendo com que a dissolução seja mais lenta. Isso ocorre porque quanto maior a quantidade de partículas em suspensão interagindo com a água, menor é a interação com a massa de 85 g de sal adicionado a suspensão, fazendo com que a dissolução demore mais para acontecer.

Importante destacar que os valores do coeficiente globais de transferência de massa para o fluido preparado com 15 e 20 lb/bbl de bentonita e 32 g/L de sal não foram apresentados devido a dificuldade de homogeneização do sistema ocasionadas pelas altas viscosidades aparentes dos fluidos em questão. É possível perceber ainda que os valores de K para as mesmas concentrações de bentonita sofrem alterações, porém pequenas, ou seja, o fator que mais influenciou no processo de dissolução foi a concentração do sal dissolvido como já discutido no item anterior.

A comparação para os valores do coeficiente global de transferência de massa encontrados na literatura e neste trabalho está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10. Comparação dos valores dos coeficientes de transferência de massa.

Autores	Valores de K (m/s)	Fluido	Condições operacionais
Aksel'rud <i>et al.</i> (1992)	1,0 x 10 ⁻⁴	Água	Partículas cilíndricas, área interfacial constante, leito fluidizado, diferentes tipos de sais.
Magalhães <i>et al.</i> (2011)	0,155-0,894 x 10 ⁻⁴	Água	Diâmetro medindo em média 1,5 mm, sistema agitado em tanque de mistura, sistema turbulento, concentração inicial variada de sal.
Patrão (2012)	5,44 x 10 ⁻⁴	Água	Unidade de escoamento em calha, diâmetro médio das partículas constante, concentração inicial de sal de 32 g/L.
Martins (2014)	1,8-5,4 x 10 ⁻⁴	Água	Diâmetro médio 1,71 mm unidade de escoamento em calha, concentrações iniciais de sal de 32, 90, 175 e 258 g/L.
Meneses (2016)	0,526-0,803 x 10 ⁻⁴	Solução de goma xantana	Diâmetro médio de partículas de 1,34 mm, sistema agitado em tanque de mistura, sistema plenamente turbulento, diâmetro médio das partículas variável, concentrações iniciais de sal de 32, 65 e 98 g/L.
Presente trabalho	0,250-0,792 x 10 ⁻⁴	Suspensão de bentonita	Diâmetro médio de partículas de 1,34 mm, sistema agitado em tanque de mistura, sistema plenamente turbulento, diâmetro médio das partículas variável, concentrações iniciais de sal de 32, 96 e 180 g/L.

No trabalho de Aksel'rud *et al.* (1992) o valor do coeficiente de transferência de massa encontrado foi 1,0 x 10⁻⁴ m/s para testes realizados com cloreto de sódio e água pura sem adição inicial de sal.

Magalhães *et al.* (2011) encontraram $1,55$ a $8,94 \times 10^{-5}$ m/s para o coeficiente de transferência de massa utilizando tanque de mistura para a avaliação da cinética de dissolução com concentração inicial de cloreto de sódio variadas. A diferença em comparação com o trabalho de Aksel'rud *et al.* (1992) pode ter sido ocasionado pela diferença da unidade e da condição experimental.

Patrão (2012) e Martins (2014) trabalham com a dissolução em calhas, encontraram valores entre $1,8 \times 10^{-4}$ a $5,4 \times 10^{-4}$ m/s pelo o fato da concentração inicial do fluido ter variado de 32 a 258 g/L. Se comparado ao valor do coeficiente convectivo de transferência de massa da água pura, os valores que os autores encontraram adicionando concentrações de sais iniciais são superiores, o que pode ter ocorrido pelo fato do aparato experimental ser diferente do utilizado por Aksel'rud *et al.* (1992).

Meneses (2016) encontrou coeficiente convectivo de transferência de massa variando de $0,526 \times 10^{-4}$ a $0,865 \times 10^{-4}$ m/s com a presença de goma xantana realizado em tanque de mistura. Os resultados obtidos por ele demonstram que tanto a concentração de sal quanto a de goma xantana influenciam no resultado do coeficiente de transferência de massa. Quanto maior foi a concentração inicial de sal na solução, menor foi o valor do coeficiente de transferência de massa, ocorrendo o mesmo quando aumentou-se a concentração de goma xantana.

Esse trabalho apresentou valores do coeficiente global de transferência de massa variando de $0,250 \times 10^{-4}$ a $0,953 \times 10^{-4}$ m/s apresentando comportamento esperado para utilização de um viscosificante na composição.

A Figura 71 apresenta a distribuição do coeficiente global de transferência de massa em função da concentração de bentonita e da concentração inicial de NaCl no fluido.

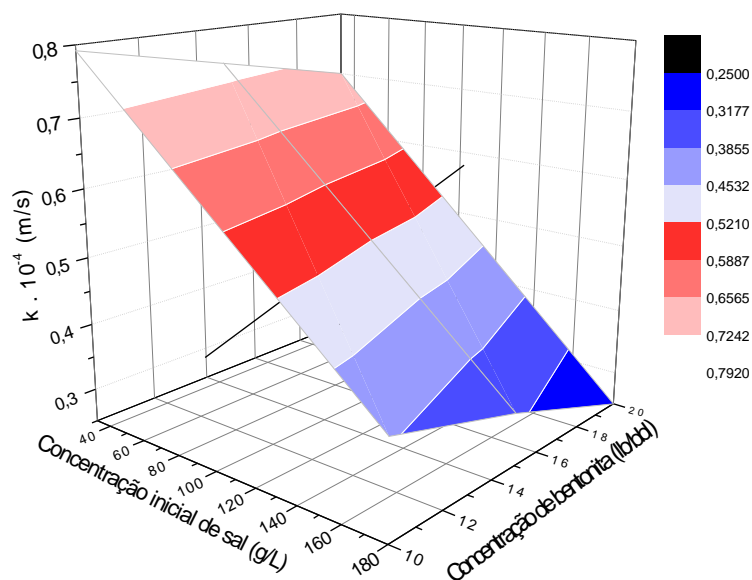


Figura 71. Distribuição do coeficiente de transferência de massa em função da concentração de bentonita e da concentração inicial de NaCl no fluido.

Para maiores valores de coeficiente convectivo de transferência de massa, maior é velocidade de dissolução e a tendência de resultado foi semelhante ao obtido com bentonita, uma vez que quanto maior a concentração de bentonita, menor foi o valor do coeficiente global de transferência de massa.

Pelo gráfico da Figura 71 confirma-se que a influência da concentração de sal é mais significativa que a da concentração de bentonita sobre os valores do coeficiente global de transferência de massa. Dado a inclinação da curva para uma concentração inicial de sal fixa.

A partir do gráfico de superfície é possível identificar para concentrações intermediárias de bentonita e sal, os valores correspondentes do coeficiente de transferência de massa, tornando o gráfico útil na visualização do K apresentado na Tabela 9.

4.8.3 Simulações

Com a obtenção do coeficiente de transferência de massa, foi possível simular a área específica de transferência de massa, o diâmetro médio das partículas, perfis de fração volumétrica dos sólidos. São alimentados dados no modelo de densidade do sólido e do líquido, concentração de saturação, coeficiente convectivo de transferência de massa, diâmetro médio das partículas, concentrações iniciais do sal e fração volumétrica.

4.8.3.1 Resultados experimentais e ajustados

As figuras abaixo apresentam a comparação dos valores experimentais e simulados da concentração de sal em solução em função do tempo.

As figuras 72, 73 e 74 são referentes a fluidos preparados com 10, 15 e 20 lb/bbl com diferentes concentrações de sal. Cada gráfico traz os resultados experimentais e os estimados com o erro experimental.

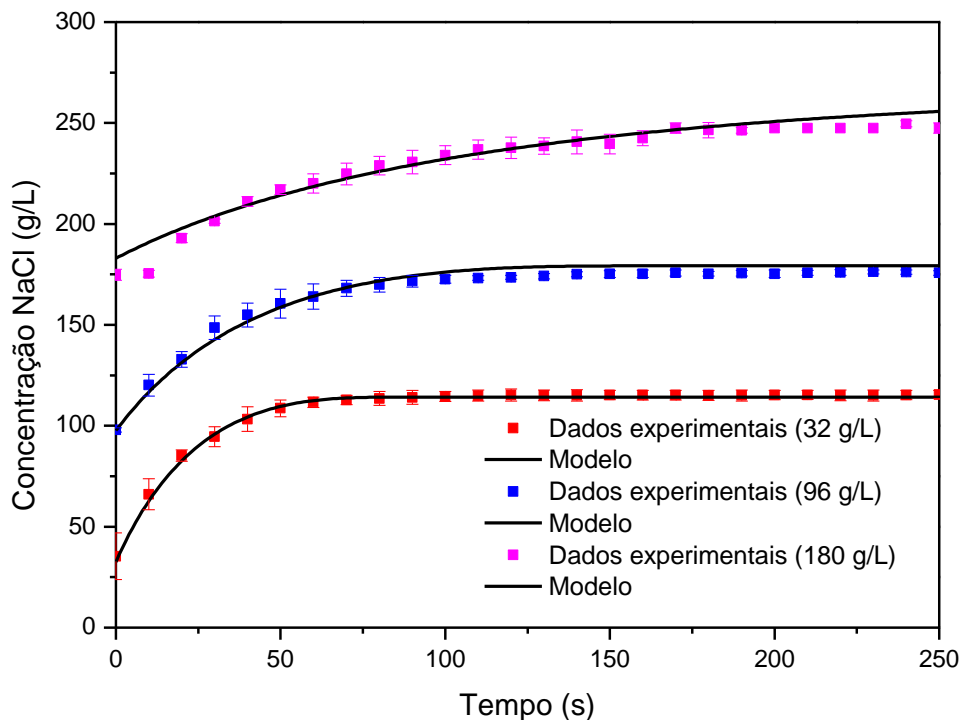


Figura 72. Perfis de concentração *versus* tempo, para concentração inicial de bentonita em 10 lb/bbl com os dados experimentais e do modelo.

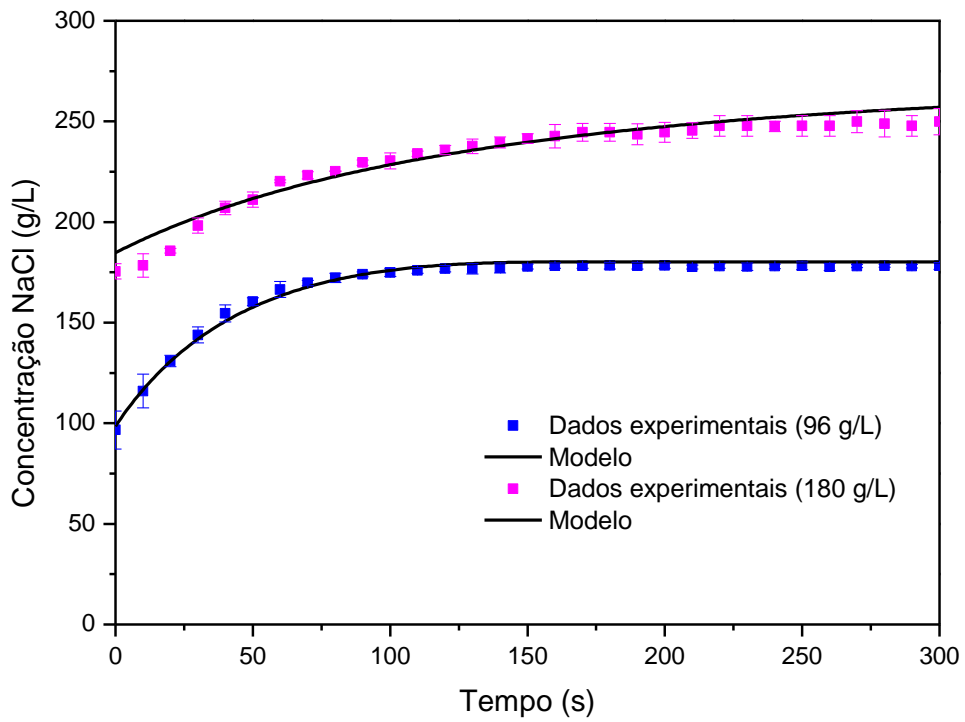


Figura 73. Perfis de concentração *versus* tempo, para concentração inicial de bentonita em 15 lb/bbl com os dados experimentais e do modelo.

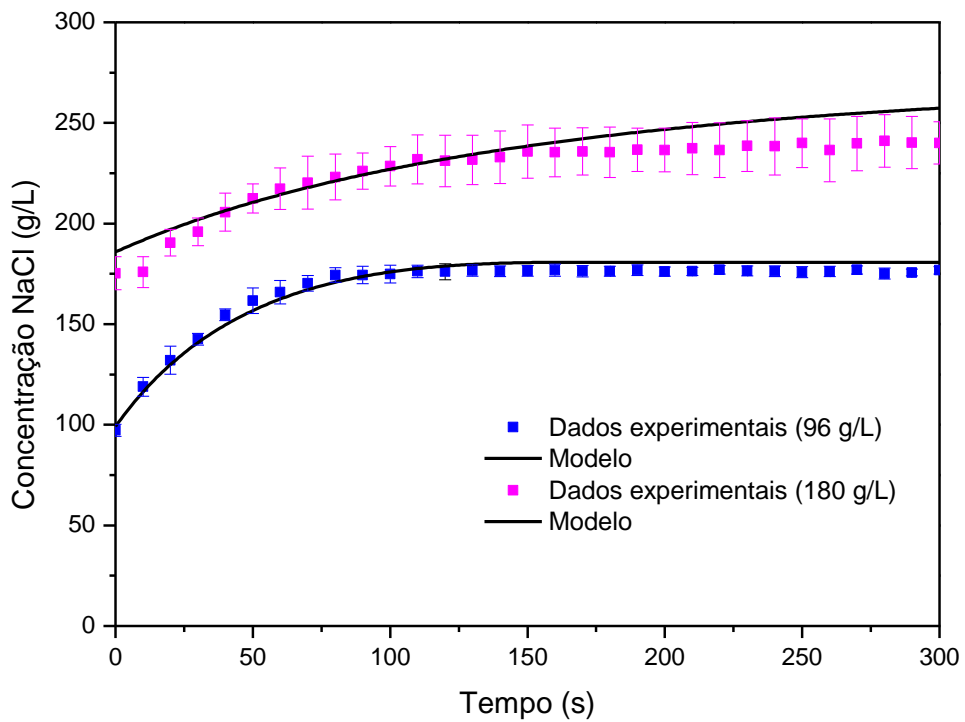


Figura 74. Perfis de concentração *versus* tempo, para concentração inicial de bentonita em 20 lb/bbl com os dados experimentais e do modelo.

As barras de erro dos pontos experimentais são referentes a duas vezes o valor do desvio padrão da triplicata. Pelas Figuras 72, 73 e 74 é possível observar que o maior erro experimental indicado pela barra de erros foi para concentração inicial de 180 g/L de sal e concentração de bentonita de 20 lb/bbl. Esse experimento apresentou a maior viscosidade aparente em relação a todos os outros testes o que dificultou a homogeneização e a medida da condutividade, aumentando assim, o erro experimental.

Pelas Figuras é possível observar comportamentos típicos quando comparamos as concentrações de sal, onde fica claro que para concentração inicial de 32 g/L de sal o processo de dissolução ocorre mais rapidamente, em torno de 70 segundos. Para concentração inicial de 96 g/L de sal, o processo de dissolução independente da concentração de bentonita, ocorre em aproximadamente em 120 segundos. Já para concentração inicial de 180 g/L de sal ocorre em 500 segundos.

A Figura 75 apresenta o resultado obtido para comparação da concentração medida experimentalmente e da concentração fornecida pelo modelo.

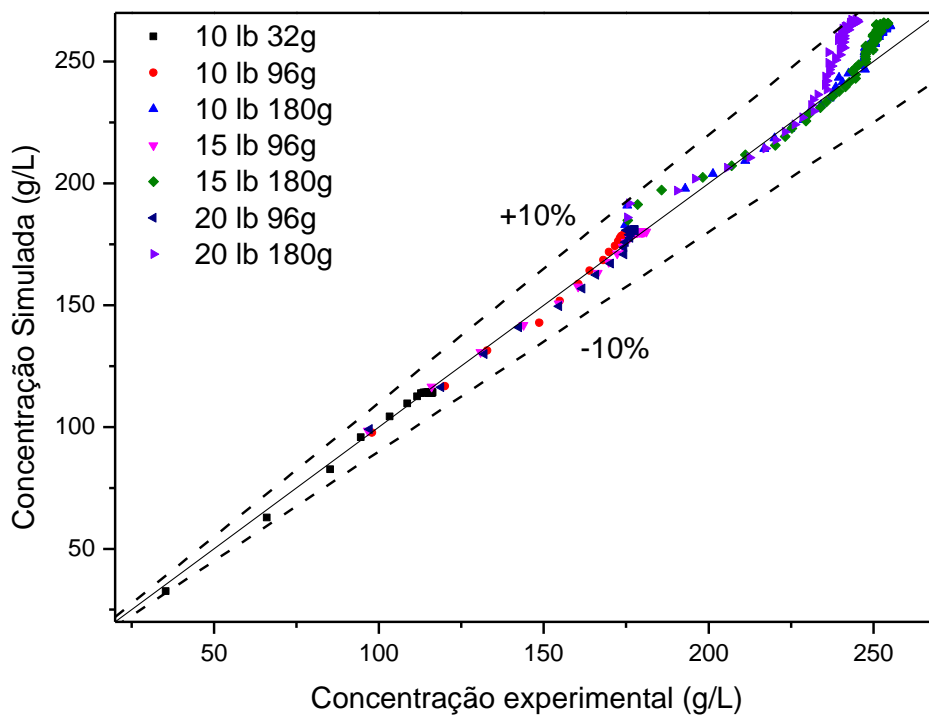


Figura 75. Concentração do modelo *versus* concentração experimental.

Observa-se no gráfico que a comparação entre os valores experimentais e simulado apresentam desvios inferiores a 10%. É possível observar ainda que os maiores desvios ocorrem para concentrações de sal de 180 g/L, podendo associar esse comportamento ao ganho de viscosidade que essa concentração de sal provoca no fluido influenciando a homogeneidade do fluido e o processo de dissolução do sal.

4.8.3.2 Simulação dos perfis de fração volumétrica dos sólidos.

As Figuras 76, 77 e 78 mostram relação de fração volumétrica *versus* tempo, simulados. Fixou-se a concentração de bentonita, variando as concentrações iniciais de sal.

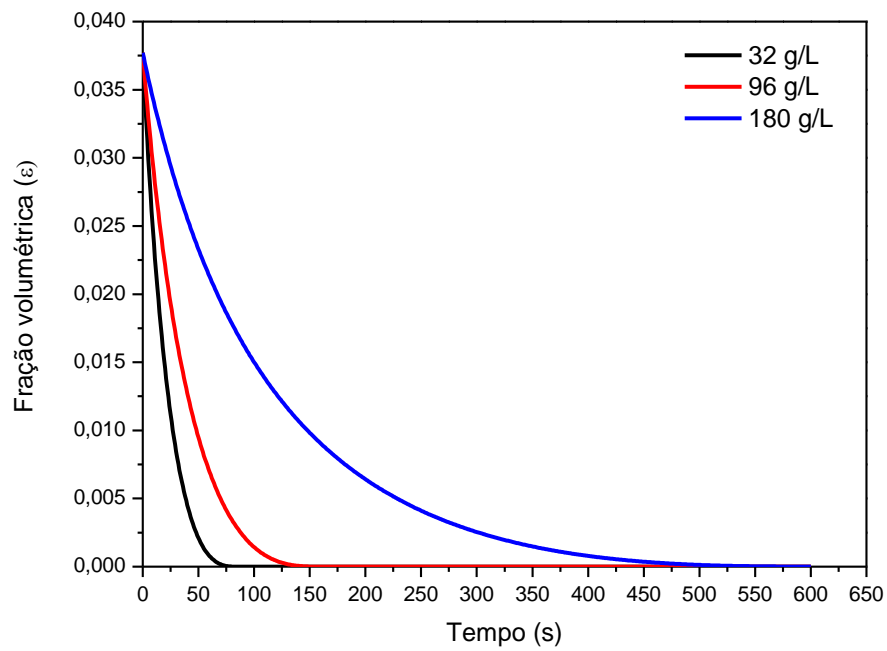


Figura 76. Perfis de fração volumétrica *versus* tempo para experimentos com 10 lb/bbl.

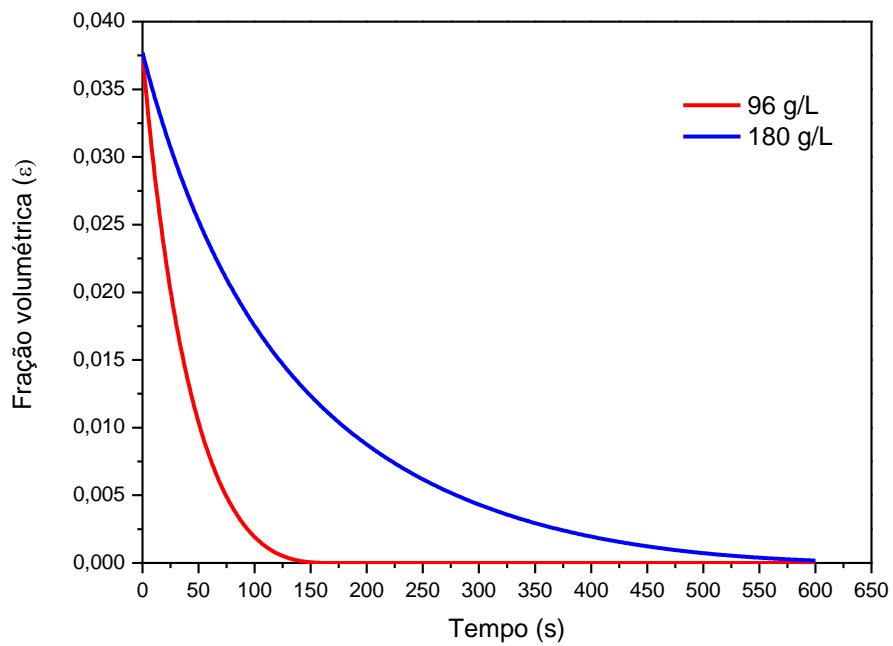


Figura 77. Perfis de fração volumétrica *versus* tempo para experimentos com 15 lb/bbl.

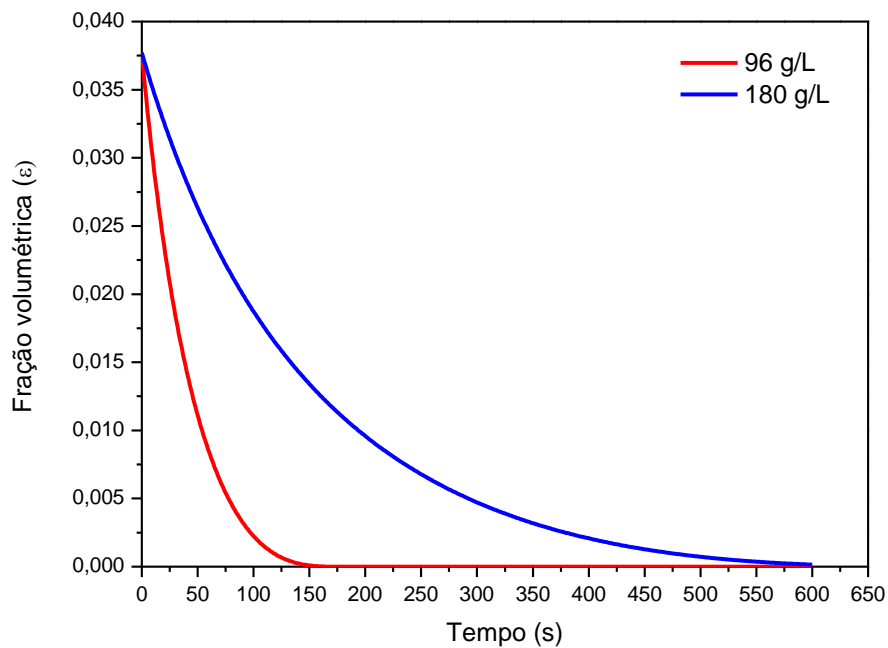


Figura 78. Perfis de fração volumétrica *versus* tempo para experimentos com 20 lb/bbl.

Ao fixar a concentração de bentonita variando-se a concentração de sal, é possível perceber que quanto menor a concentração de sal, mais rápida ocorre o decréscimo da fração volumétrica até atingir o ponto zero que é quando a dissolução ocorre completamente. Estes resultados mostram a forte influência da concentração de sal na solução.

As Figuras 79, 80, e 81 apresentam perfis de fração volumétrica *versus* tempo, fixando a concentração de sal e variando a concentração de bentonita.

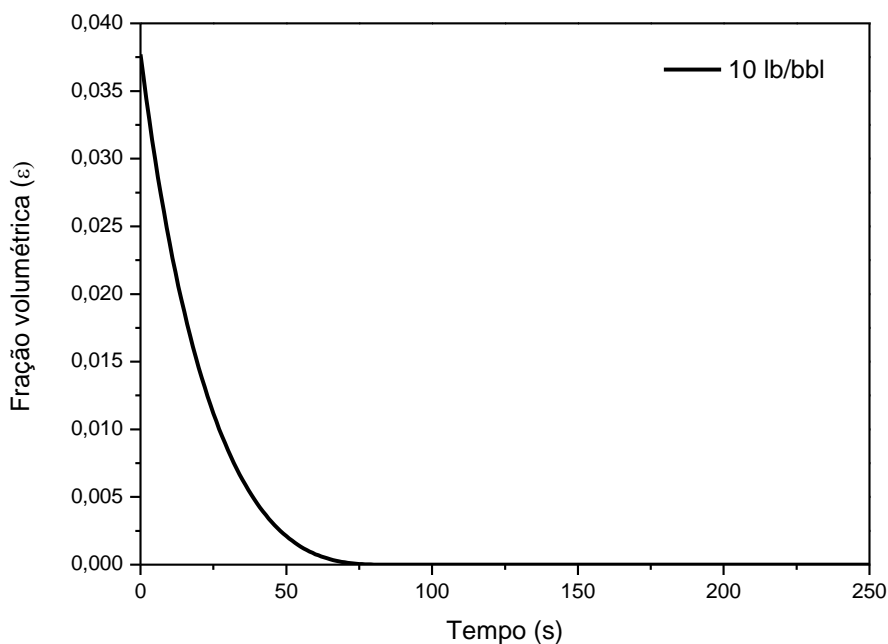


Figura 79. Perfis de fração volumétrica *versus* tempo para experimentos com 32 g/L de sal.

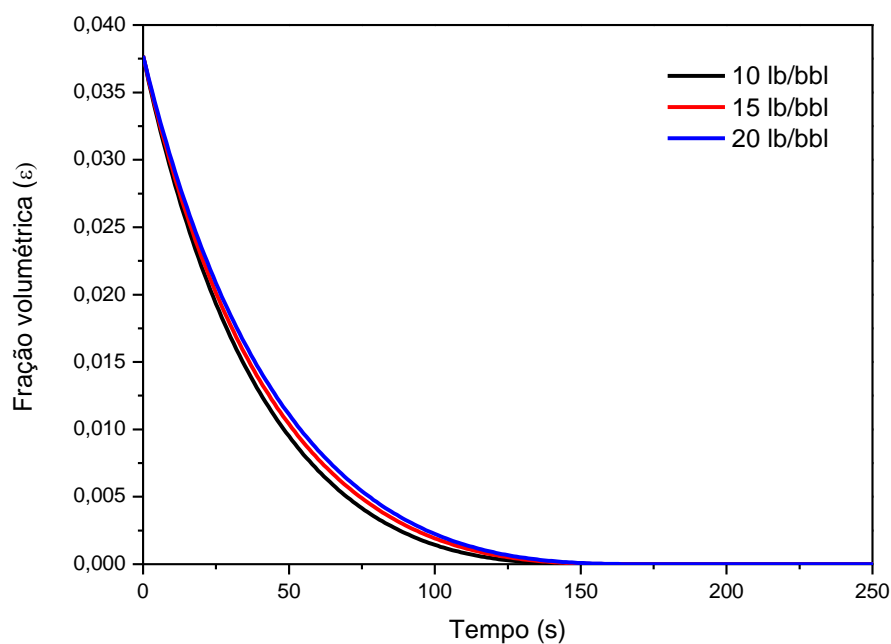


Figura 80. Perfis de fração volumétrica *versus* tempo para experimentos com 96 g/L de sal.

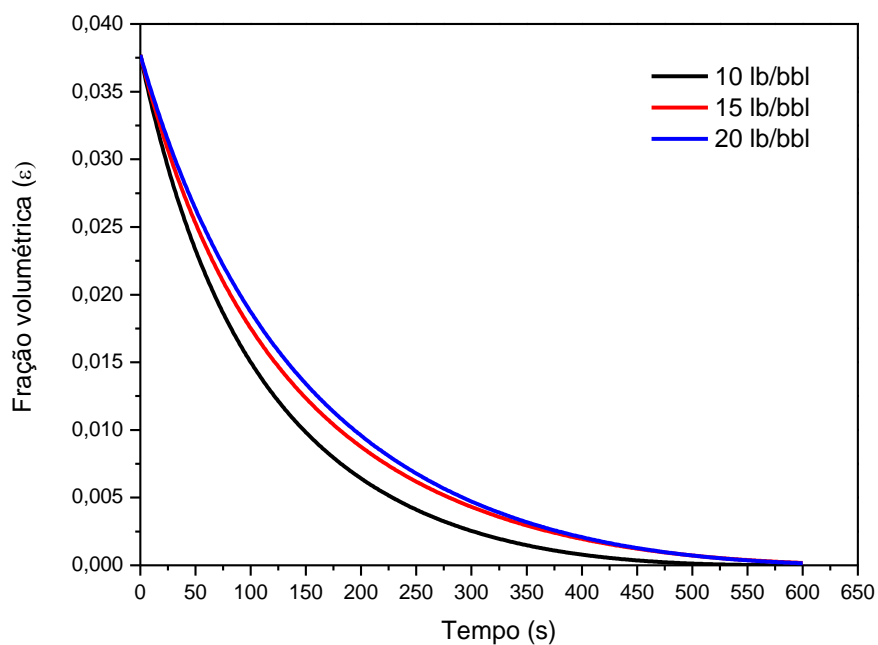


Figura 81. Perfis de fração volumétrica *versus* tempo para experimentos com 180 g/L de sal

Ao fixar o valor do sal é possível perceber uma proximidade nas curvas de frações volumétricas para diferentes concentrações de bentonita, isso é uma tendência esperada uma vez que os resultados experimentais mostram coeficientes globais de transferência de massa bem próximas principalmente para as concentrações de 96 g/L de sal.

4.8.3.3 Diâmetro médio das partículas

Neste caso, também serão apresentados somente resultados gerados pela simulação do diâmetro médio de partículas.

Os resultados demonstrados pelas Figuras 82, 83 e 84 mostram o diâmetro médio *versus* tempo, fixando a concentração de bentonita e variando a concentração de sal.

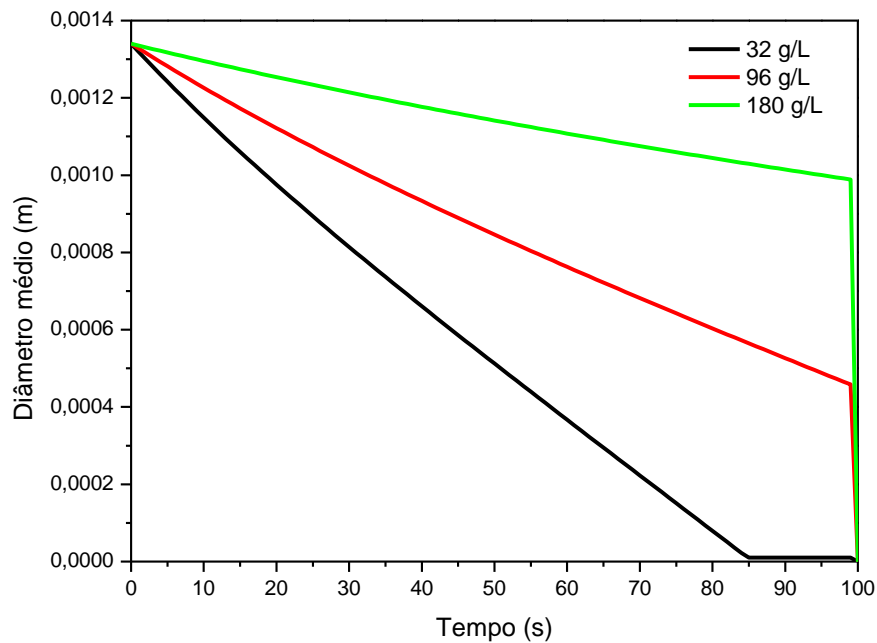


Figura 82. Perfis de diâmetro médio *versus* tempo para fluido com 10 lb/bbl de bentonita.

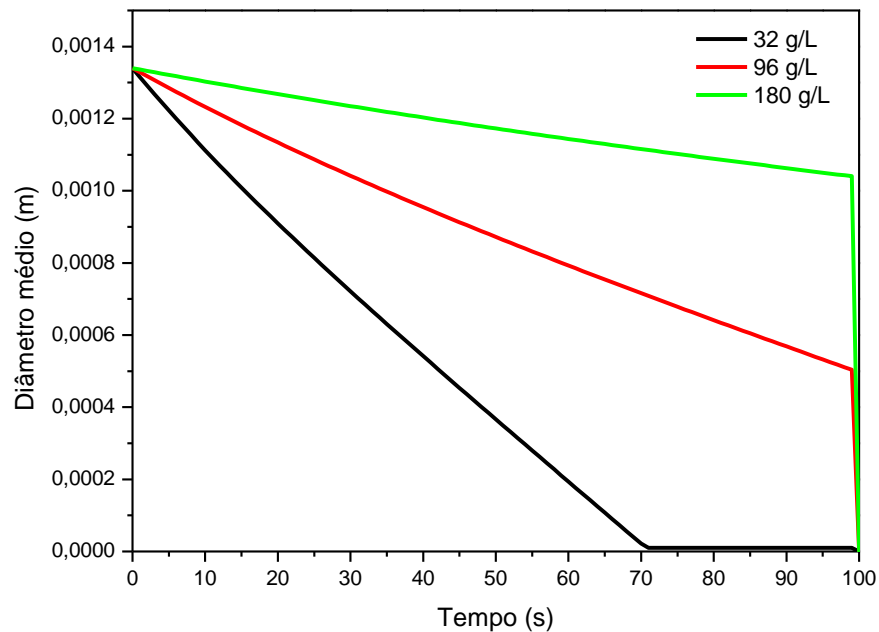


Figura 83. Perfis de diâmetro médio *versus* tempo para fluido com 15 lb/bbl de bentonita.

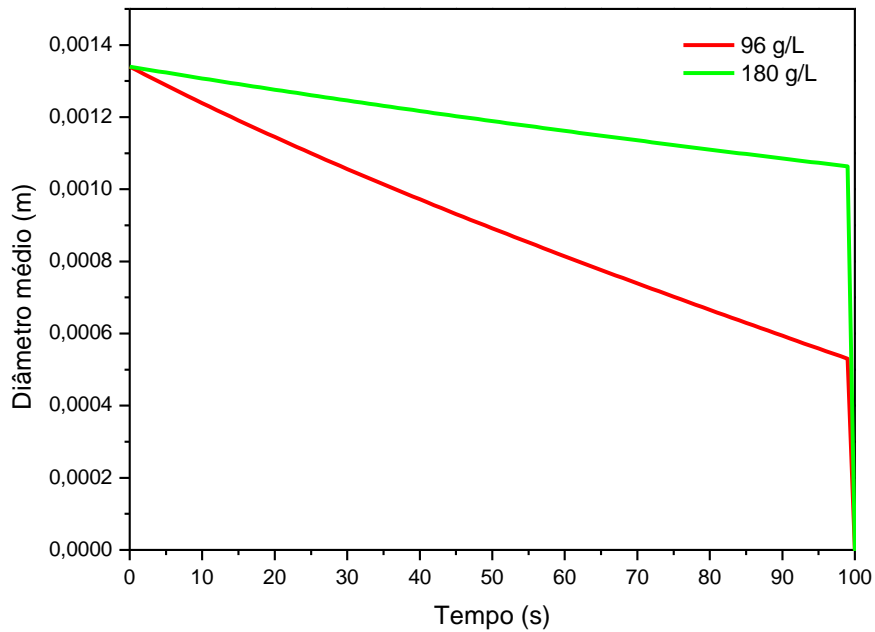


Figura 84. Perfis de diâmetro médio *versus* tempo para fluido com 20 lb/bbl de bentonita.

A partir dos dados gerados para o diâmetro médio de partículas *versus* tempo é possível ver o efeito esperado de cinética, onde houve declínio mais acentuado quanto menor a concentração de bentonita.

As Figuras 85, 86 e 87 apresentam o diâmetro médio *versus* tempo fixando a concentração de sal e variando a concentração de bentonita.

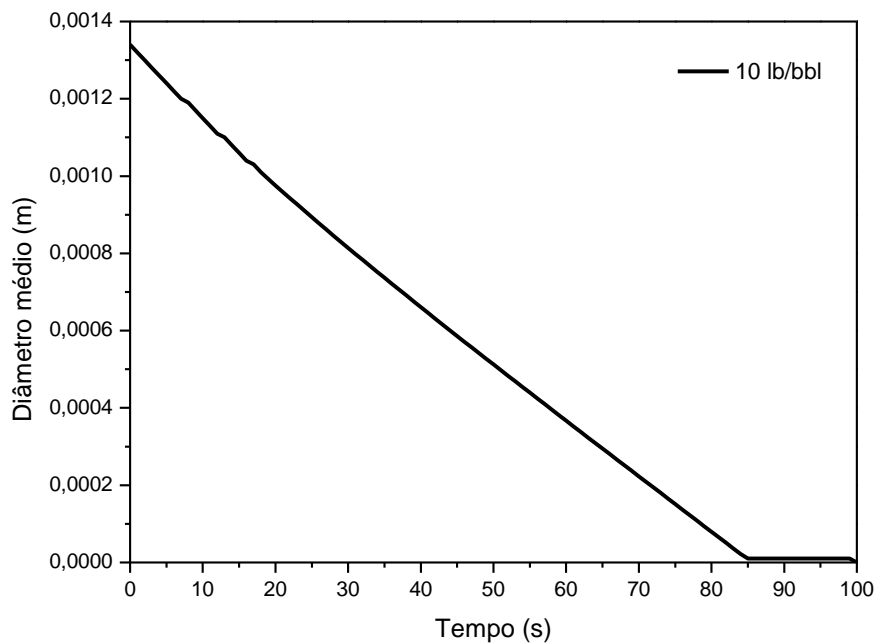


Figura 85. Perfis de diâmetro médio *versus* tempo para fluido com 32 g/L de sal.

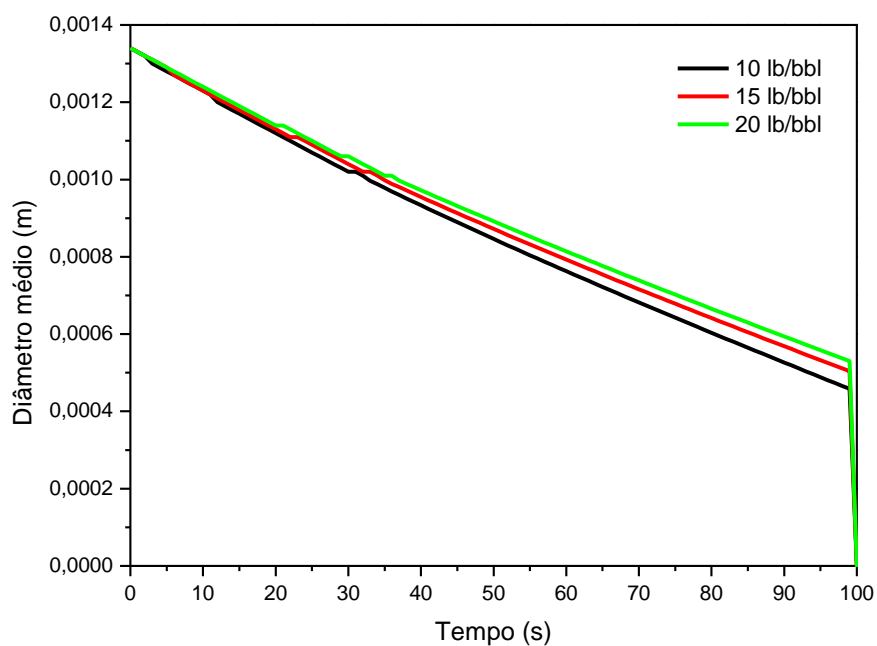


Figura 86. Perfis de diâmetro médio *versus* tempo para fluido com 96 g/L de sal.

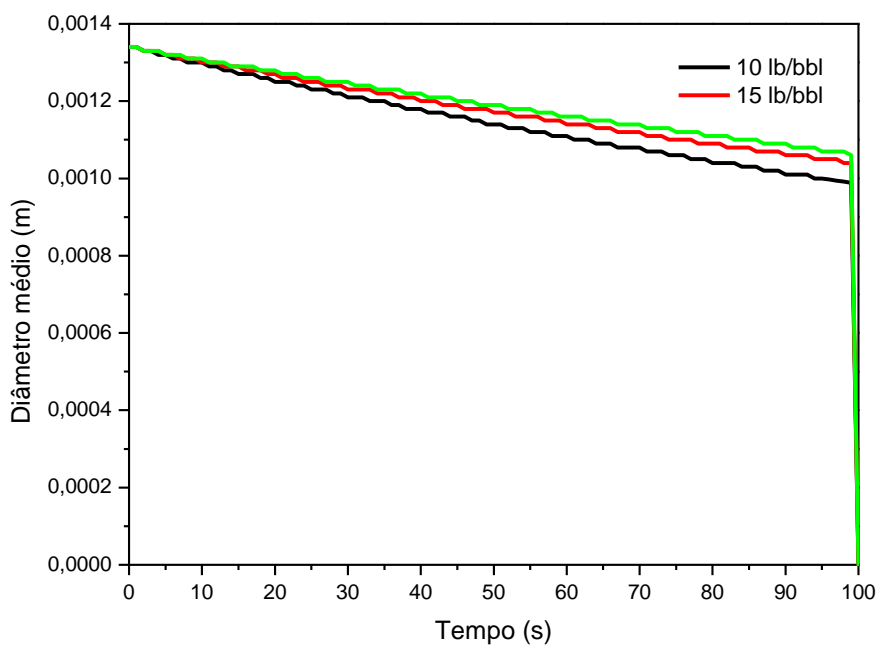


Figura 87. Perfis de diâmetro médio *versus* tempo para fluido com 180 g/L.

No caso dos perfis do diâmetro médio das partículas em função do tempo, percebe-se a proximidade das curvas como foi visualizado nos perfis de concentração e fração volumétrica.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

Abaixo seguem as principais conclusões obtidas:

Caracterização

- O teste de difratometria de raios X permitiu identificar os componentes presentes nas amostras e indicou que o material trabalhado é uma argila bentonítica;
- Os testes de inchamento mostraram que para a bentonita estudada, sete dias não foi tempo suficiente para haver a completa hidratação do material;

Testes reológicos

- O aumento da concentração de bentonita influencia diretamente o aumento da viscosidade aparente;
- O tempo de hidratação é um fator importante a ser acompanhado uma vez que quanto maior a hidratação da bentonita, maior é a viscosidade aparente do fluido;
- O sal dissolvido na suspensão proporciona decréscimo na viscosidade aparente provavelmente devido a compressão da dupla camada difusa;
- Grandes concentrações de sal provocam acréscimo da viscosidade aparente da suspensão, fenômeno associado na literatura à desagregação da dupla camada.

Testes de cinética

- Pode-se perceber que quanto maior a concentração de bentonita mais lenta é a dissolução do sal.
- A concentração de sal inicial no sistema afeta a cinética de dissolução, sendo que a medida que a concentração aumenta a velocidade de dissolução das partículas de sal diminui;
- É possível perceber que a concentração inicial de sal na suspensão traz maior impacto no comportamento da dissolução do que a concentração de bentonita.

Estimação de parâmetros e simulação

- A partir do modelo foi possível estimar os coeficientes globais de transferência de massa utilizando uma modelagem fenomenológica;
- O aumento considerável da viscosidade aparente prejudica a homogeneidade do sistema, tornando o processo de dissolução mais lento e até mesmo dificultando a completa dissolução do sal;
- Os parâmetros estimados apresentam ajustes com boa confiabilidade, resultados estimados e os experimentais apresentaram comportamentos esperados.
- O erro experimental da triplicada foi baixo indicando uma boa reprodutividade dos ensaios
- a comparação entre resultados experimentais e calculados pelo modelo apresentaram desvios inferiores a 10%.

Por fim, com base nos resultados experimentais obtidos e com base na literatura apresentada, pode-se concluir que o modelo que vem sendo aprimorado ao longo dos anos no

Laboratório de Escoamento de Fluidos tem capacidade de fornecer dados modelados de que com baixos desvios relativos. É relevante destacar que o estudo da dissolução de partículas de sal em fluidos preparados com viscosificantes são importantes para a indústria de petróleo e para as pesquisas acadêmicas.

CAPÍTULO VI

6 SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

Para trabalhos posteriores a esse trago como sugestão:

- Utilizar outras faixas de concentração de bentonita, objetivando comparar o efeito encontrado neste trabalho;
- Utilizar diferentes faixas de concentração de sal, para explicar e compreender com mais clareza a interação que ocorre entre a bentonita e o sal;
- Adicionar um polímero para compreender sua influência na reologia e na cinética de dissolução;
- Utilizar outras variedades de sais.

CAPÍTULO VII

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-JDAYIL, B. Rheology of Sodium and Calcium Bentonite-Water Dispersions: Effect of Electrolytes and Aging Time. *International Journal of Mineral Processing*. Elsevier, 98, p. 208-213, 2011.

AKSEL'RUD, G.A., BOIKO, A.E.; KASHCHEEV, A.E. Kinetics of the solution of mineral salts suspended in a liquid flow. UDC 532.73-3. SPE (Society of Petroleum Engineers), 1992.

ALKATTAN, M., OELKERS E. H., DANDURAND J. L., SCHOTT J. Experimental Studies of Halite Dissolution Kinetics, 1 The Effect of Saturation State and the Presence of Trace Metals. *Chemical Geology*. Elsevier, 137, p. 201-219, 1997.

ALI, S.; BANDYOPADHYAY, R. Effect of Electrolytes on The Microstructure and Yielding of Aqueous Dispersions of Colloidal Clay. Royal Society of Chemistry. India, 2015.

AMORIM, C. L. G. Estudo do Efeito das Interações Água-Argila no Inchamento dos Argilominerais Através da Difração de Raios X. Tese de Doutorado. Ciências em engenharia Nuclear. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2007.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=83015&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1476033_762528> acessado em: 21 de set. de 2016.

BALTAR, C. A. M.; LUZ, A. B. Insumos Minerais para a Perfuração de Poços de Petróleo; CETEM, Rio de Janeiro, 2003.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, F. R. S. K. An Introduction to Rheology. 3rd Edition. Elsevier, p. 199. England, 1989.

BARNES, H. A. A Handbook of Elementary Rheology. Aberystwyth: University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, p. 200. England, 2000.

BENNETT, C. O.; MEYERS, J. E. Fenômenos de transporte: quantidade de movimento, calor e massa. McGraw-Hill do Brasil. São Paulo, 1978.

BROOKFIELD, < <http://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/temp-tc-502.asp>>, acessado em: 03 de out. de 2016.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport Phenomena. 2nd Edition. Chemical Engineering Department. University of Wisconsin-Madison, 2002.

CAENN, R., DARLEY, H. C. H., GRAY, G. R. Fluidos de perfuração e complementação. 6^a Edição. Editora Elsevier. Rio de Janeiro, 2014.

CARDOSO, J. J. B.; LOPES, R. T.; NETO, J. C. Q. Estudo do Inchamento de Bentonitas Sódicas e Avaliações do Desempenho de Inibidores pela Difração de Raio X. Associação Brasileira de Energia Nuclear. São Paulo, 2005.

CASTELLAN, G. Fundamentos de Físico-Química. Rio de Janeiro: LTC, 1986.

CORRÊA, O. L. S. Noções sobre Exploração, Perfuração, Produção e Microbiologia. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda. PETROBRAS, 2003.

CREMASCO, M. A. Fundamentos de Transferência de Massa. 2ª Edição. Editora Unicamp, 2002.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. 5nd Edition. Gulf Publishing Company. United States, 1988.

DELPECH, M. C.; MIRANDA, G. S.; ESPÍRITO SANTO, W. L. Dispersões Aquosas à Base de Nanocompósitos de Poliuretanos e Argilas Hidrofílicas Brasileiras: Síntese e Caracterização. Polímeros, vol. 21, n° 4, p. 315-320. Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

DIÁRIO DO PRÉ-SAL, < <https://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>>, acessado em: 10 de out. de 2016.

DUMAN, O.; TUNÇ, S. Electrokinetic and Rheological Properties of Na-Bentonite in Some Electrolyte Solution. Microporous and Mesoporous Materials 117, p. 331-338, Turkey, 2009.

EUROSUL, <http://www.eurosul.com/index.php?pag=conteudo&id_conteudo=624&idmenu=72&hamilton-beach-agitadores>, acessado: em 23 de ago. de 2016.

EUROSUL, http://www.eurosul.com/index.php?pag=conteudo&id_conteudo=887&idmenu=72&fann-balanca-de-lama-140, acessado em: 23 de ago. de 2016.

FERNÁNDEZ, E. F.; JUNIOR, O. A. P.; PINHO, A. C. Dicionário do petróleo em língua portuguesa: exploração e produção de petróleo e gás; 1ª Edição; Lexikon Editora, Rio de Janeiro, 2014.

FIRME, P. A. L. P. Modelagem Constitutiva e Análise Probabilística Aplicadas a Poços em Zonas de Sal. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2013.

FISATOM, < http://www.fisatom.com.br/agitadores_mecanicos.html>, acessado em: 03 de out. de 2016.

GUIMARÃES, I. B., ROSSI, L. F. S. Estudo dos Constituintes dos Fluidos de Perfuração: Proposta de uma Formulação Otimizada e Ambientalmente Correta, 4º PDPETRO. São Paulo, 2007.

GRIM, R. E. Relation of the composition to the Properties of Clay. Journal of the American Ceramic Society, Vol 22, n° 5. Illions, 1939.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentals of Heat Mass Transfer. 6nd Edition. John Wiley & Sons, 2007.

KELESSIDIS, V. C.; CHRISTINA, T.; DALAMARINIS, P. Effect of pH and electrolyte on the rheology of aqueous Wyoming bentonite dispersions. Applied Clay Science 38, p. 86-96. Greece, 2007.

LIDE, D. R. CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, 90th Edition, 2010.

LOMBA, R. Fluidos de Perfuração. Apostila de Pós-Graduação Lato Sensu. PUC. Rio de Janeiro, 2007.

LUZ, A. B., LINS, F. A. F. Rochas e Minerais Industriais Usos e Especificações. CETEM, 2^a Edição. Rio de Janeiro, 2008.

MACHADO, J. C. V. Reologia e Escoamento de Fluidos, Ênfase na Indústria do Petróleo. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

MAGALHÃES, S. C.; FONSECA, T. F.; DEMAUIR, M.; PINTO, J. C.; CALÇADA, L. A.; SCHEID, C. M. Determinação do Coeficiente de Transferência de Massa do Cloreto de Sódio em Água em Sistemas Agitados. ENEMP, 2011.

MAGALHÃES, S. C.; CALÇADA, L. A.; SCHEID, C. M.; PINTO, J. C. Determinação do Coeficiente de Transferência de Massa do Cloreto de Sódio em Água em Sistemas Agitados. ENGEVISTA, v. 16, n. 3, p. 330-345, 2014.

MALVERN, <<https://www.malvern.com/en/support/product-support/mastersizer-range/mastersizer-2000/>>, acessado em: 23 de ago. de 2016.

MARTINS, L. A. A. Modelagem e Determinação do Coeficiente Convectivo de Transferência de Massa de Partículas de NaCl no Escoamento de Salmoura. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), 2014.

MELO, K. C. Avaliação e Modelagem Reológica de Fluidos de Perfuração Base Água. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado. Natal, 2008.

MENESES, J. P. C. H. Estudo da Dissolução de Partículas de NaCl em Fluidos não-Newtonianos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2016.

METTLER, <http://www.mt.com/br/pt/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH/benchtop_meter/SevenCompact/S230_Cond.html>, acessado em: 03 de ago. de 2016.

MORAIS, J. M. Petróleo em Águas Profundas: Uma História Tecnológica da Petrobras na Exploração e Produção *Offshore*. Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada - Petrobras, Brasília, 2013.

NELSON <http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/slopestability.htm> acessado em: 10 de jan. de 2017.

NITAWAKI, Y.; WADA, K.; EGASHIRA, K. Particle-Particle and Particle-Water Interactions in Aqueous Clay Suspensions. Part II. Viscosity Data and Interpretation, Clay Science 5, p. 319-331. Japan, 1981.

PATRÃO, W. C. F. Estudo teórico e experimental da dissolução de partículas de NaCl no escoamento em salmoura. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2012.

PEÇANHA, R. P. Operações Unitárias Envolvendo Partículas e Fluidos. Elsevier Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2014.

PEREIRA, E. Fluidos de Perfuração: O Uso de Inibidores de Argila como Solução dos Problemas de Sondagem. In: Anais Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. Recife, 2001.

PERRY, R. H.; Chilton, C. H. Chemical Engineers' Handbook, 5th. edt., New York, McGraw-Hill Book Co., 1973.

PETROBRAS. Pré-sal. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/area-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>, acessado em: 04 de nov. de 2016.

PETROBRAS – Áreas de atuação (plataformas), <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>>, acessado em: 07 de jan. de 2017.

PRÓ-ANÁLISE, < <https://www.pro-analise.com.br/produto/picnometro-25ml-calibrado-precis-o-0-001cm3-acompanha-certificado-do-fabricante-brand-und-1194>>, acessado em: 30 e ago. de 2016.

RIGZONE, <http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=291&c_id=24>, acessado em: 04 de jan. de 2017.

RIGAKU, <<https://www.rigaku.com/pt-br/products/xrd/miniflex>>, acessado em: 11 de nov. de 2016.

ROCHA, L. A. S.; AZUAGA, D.; ANDRADE, R.; VIEIRA, J. L. B.; SANTOS, O. L. A. Perfuração Direcional. , 3ª Edição, Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2011.

SCHRAMM, G. A Practical Approach to Rheology and Rheometry. 2nd Edition, Gebrueder HAAKE GmbH. Federal Republic of Germany, 2000.

SHIROMA, P.H. Estudo do Comportamento Reológico de Suspensões Aquosas de Bentonita e CMC: Influência da Concentração do NaCl. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

SILVA, M. V. C., Caracterização Reológica da Argila Bentonítica Derivada do Intemperismo de Basaltos – Formação Mosquito, Bacia do Parnaíba, sul do Maranhão. Relatório Técnico Científico. Universidade Federal do Pará, Pará, 2011.

SILVA, F. R. G., Dinâmica do transporte de cascalhos solúveis em fluidos de perfuração de poços de petróleo. 77 p. Projeto de graduação apresentado ao curso de Engenharia de Petróleo. UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

SIMON, B. Dissolution Rates of NaCl and KCl in Aqueous Solution. Journal of Crystal Growth 52, p. 789-794, France, 1981.

SKELLAND, A. H. P. Non Newtonian flow and heat transfer. Wiley Edition, 469 pp. New York, 1967.

SOUZA SANTOS, P., Ciência e Tecnologia de Argilas, Volume 1, 2ª Edição, Editora: Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1989.

STEFFE, J. F. Rheological Methods in Food Process Engineering. 2nd Edition, East Lansing - Freeman Press. United States, 1996.

TONNESEN, D. A.; BERTOLINO, L. C.; LUZ, A. B.; TIMÓTEO, D. M. O. Caracterização Mineralógicas e Beneficiamento das Bentonitas da Região de Cubati e Pedra Lavrada-PB. Holos, v. 1, 2012.

THERMO FISHER, <<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/379-0001>>, acessado em: 27 de out de 2016.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2ª Edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

TREYBAL, R. E. Mass Transfer Operations. 3rd Edition. McGraw-Hill, Singapore, 1981.

YILDIZ, N.; SARIKAYA, Y.; ÇALIMI, A. The effect of the electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na₂CO₃ – activated Kütahya bentonite. Elsevier, Applied Clay Science 14, p. 319-327. Turkey, 1999.

ANEXO – Resultados complementares

1. Resultados do efeito da concentração de bentonita no fluido. Fluidos de 10 lb/bbl, 15 lb/bbl e 20 lb/bbl sem a presença de sal para os demais dias.

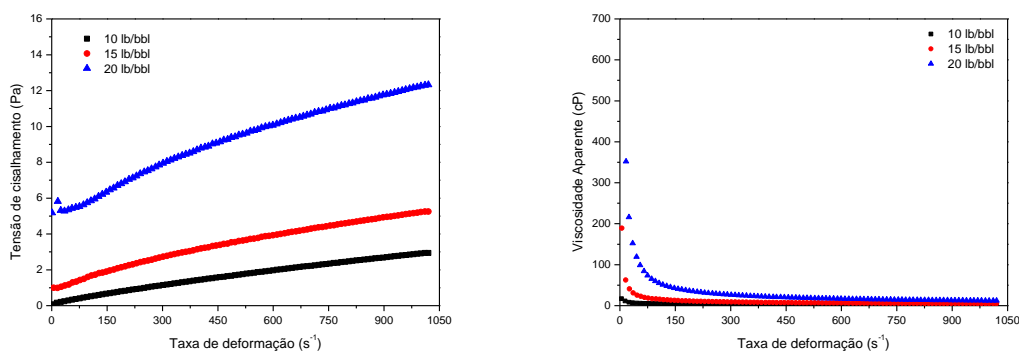


Figura 88. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 1.

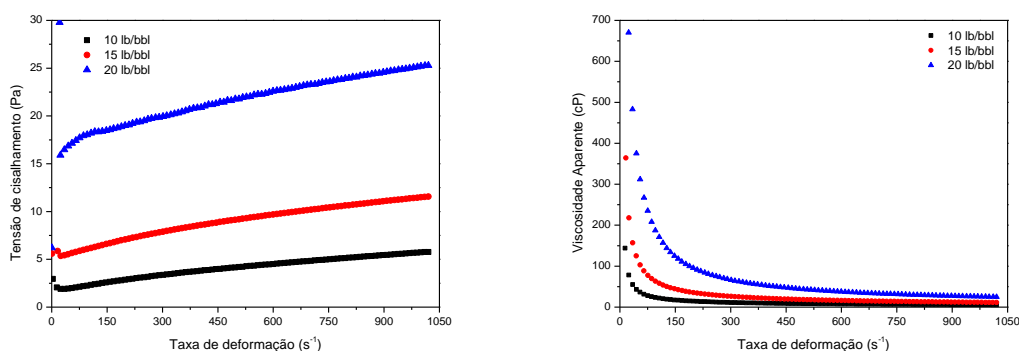


Figura 89. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal - Dia 3.

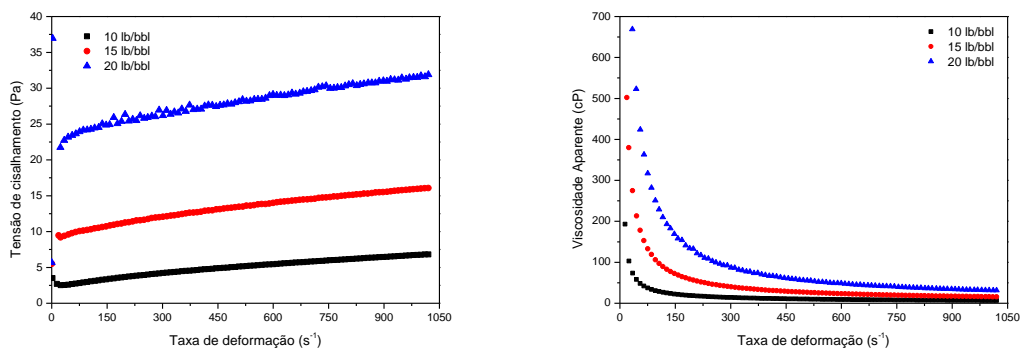


Figura 90. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 4.

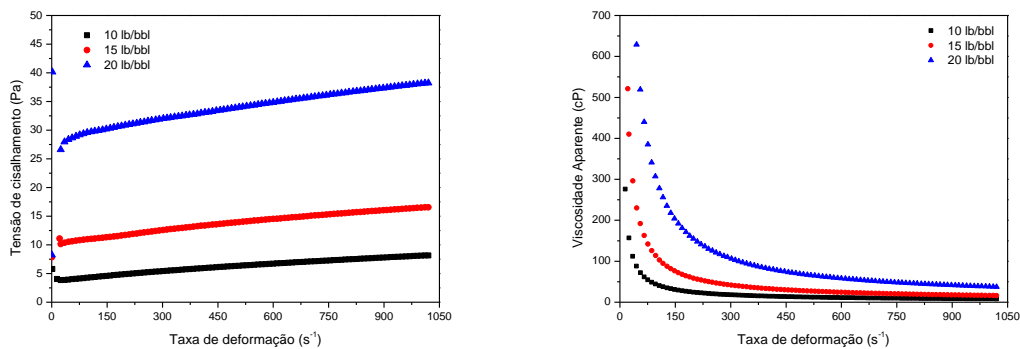


Figura 91. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 5.

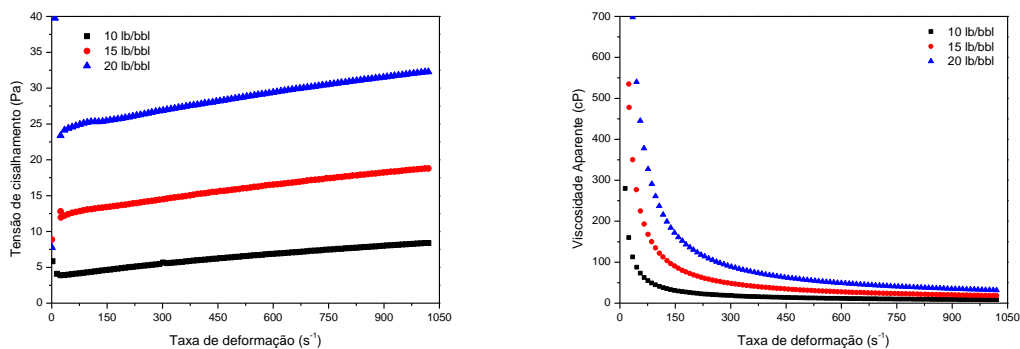


Figura 92. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 0 g/L de sal. - Dia 6.

2. Resultados do efeito da concentração de bentonita no fluido. Fluidos de 10 lb/bbl, 15 lb/bbl e 20 lb/bbl com 32g/L de sal.

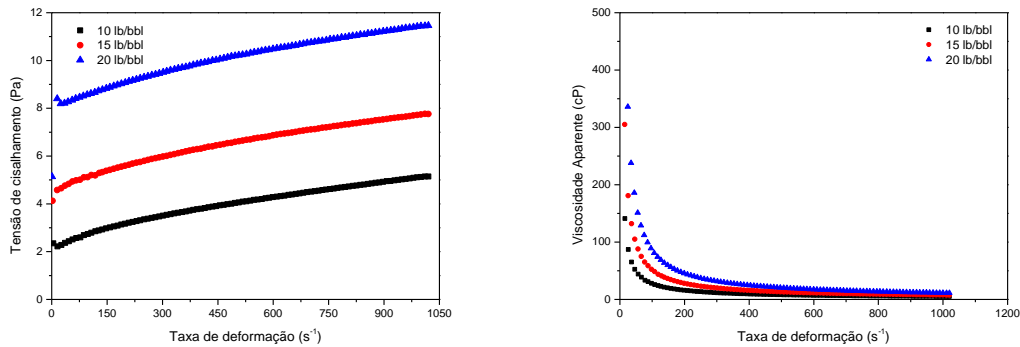


Figura 93. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 1.

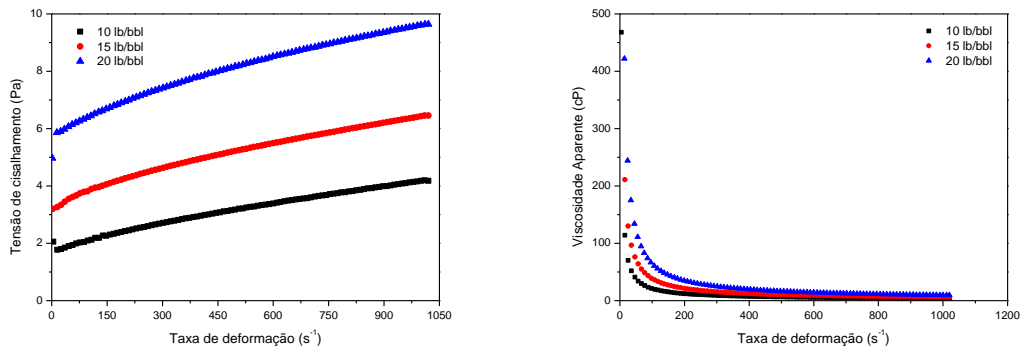


Figura 94. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 3.

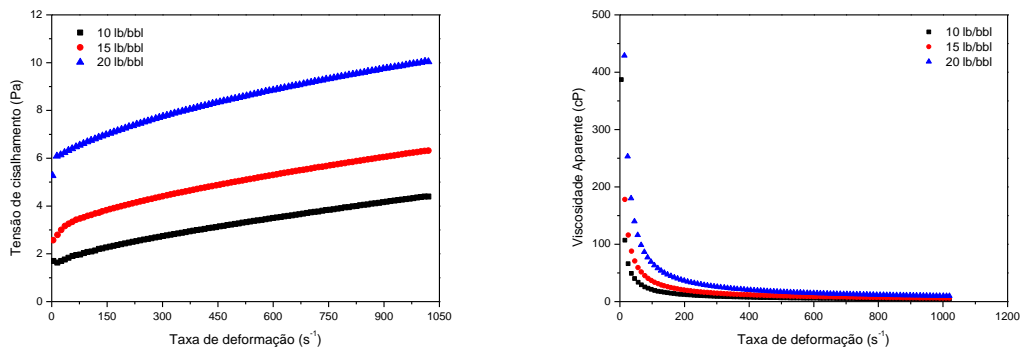


Figura 95. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 4.

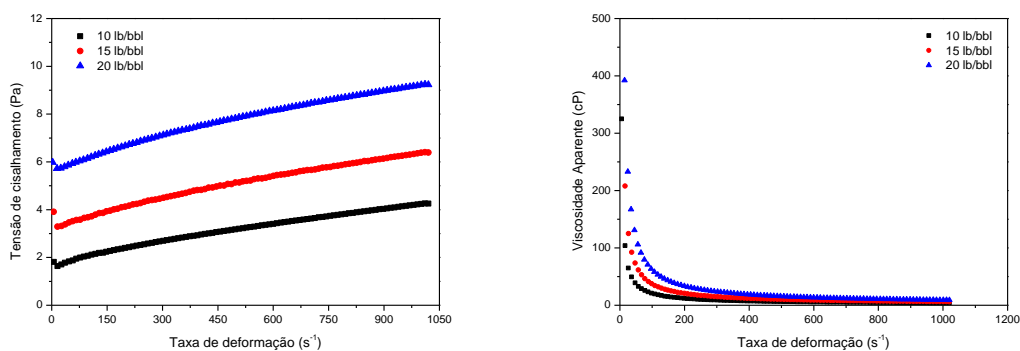


Figura 96. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 5.

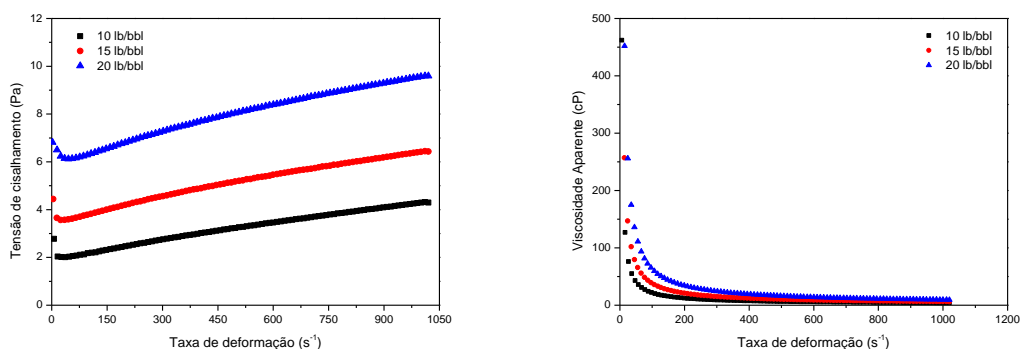


Figura 97. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 32 g/L de sal. - Dia 6.

3. Resultados do efeito da concentração de bentonita no fluido. Fluidos de 10 lb/bbl, 15 lb/bbl e 20 lb/bbl com 96g/L de sal.

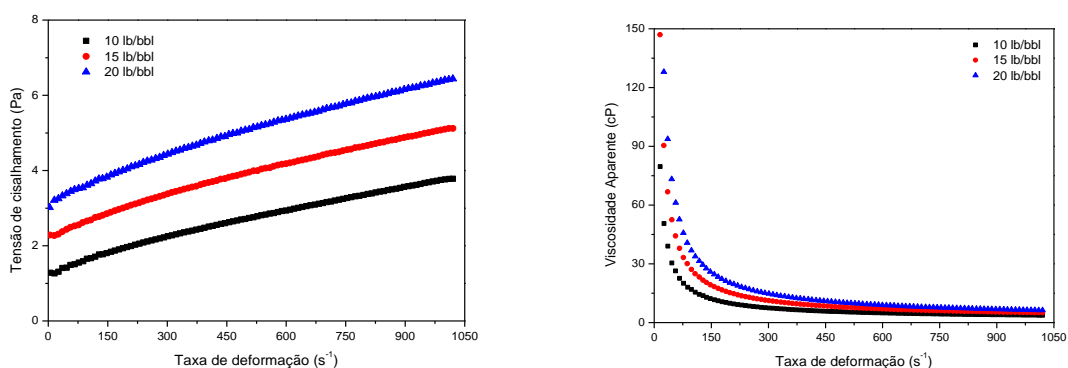


Figura 98. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 96 g/L de sal. - Dia 1.

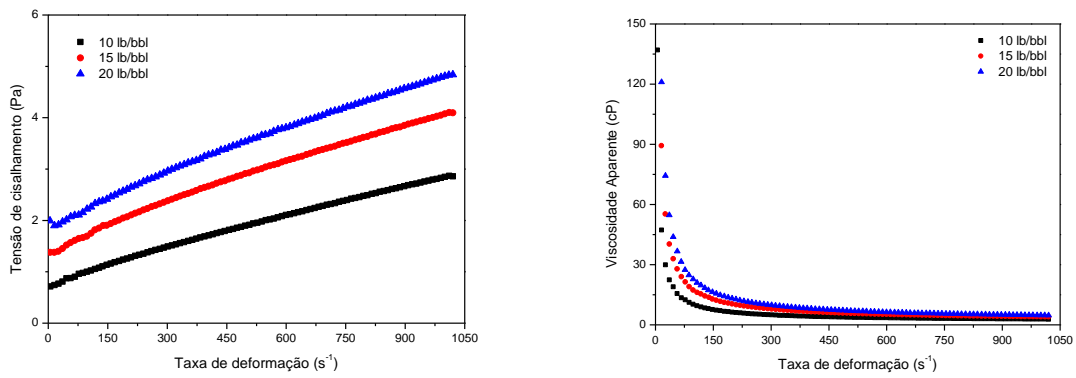


Figura 99. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 96 g/L de sal. - Dia 3.

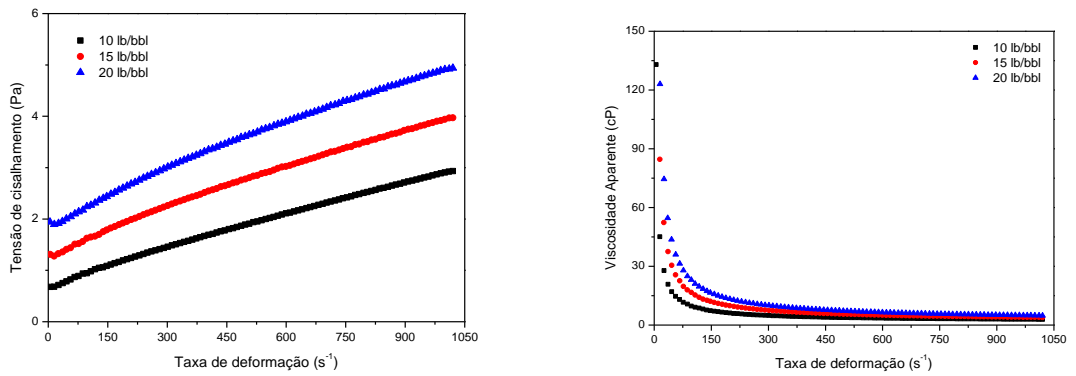


Figura 100. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 96 g/L de sal. - Dia 4.

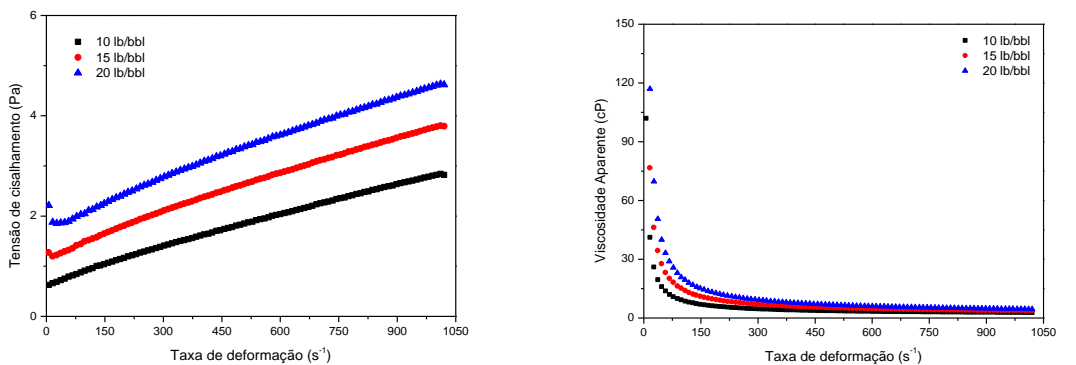


Figura 101. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 96 g/L de sal. - Dia 5.

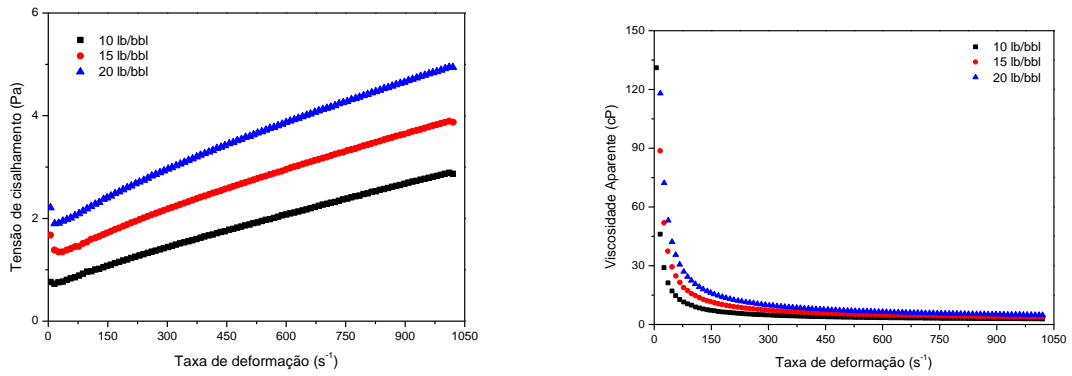


Figura 102. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 96 g/L de sal. - Dia 6.

4. Resultados do efeito da concentração de bentonita no fluido. Fluidos de 10 lb/bbl, 15 lb/bbl e 20 lb/bbl com 180 g/L de sal.

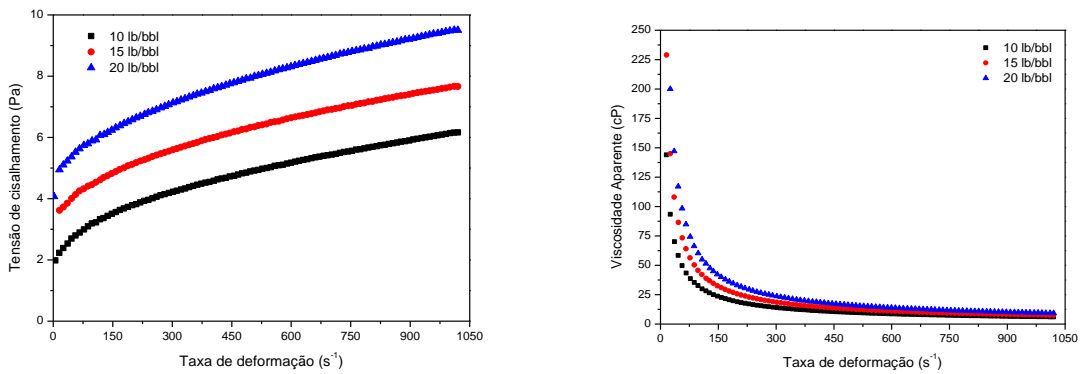


Figura 103. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 180 g/L de sal. - Dia 1.

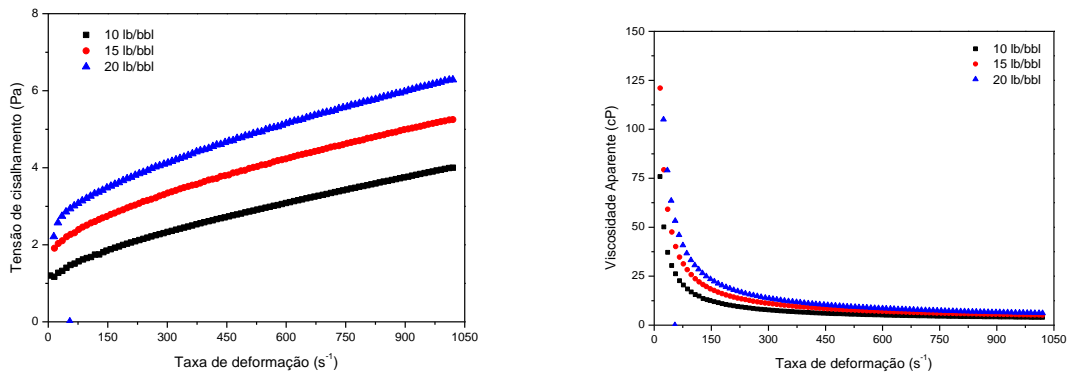


Figura 104. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 180 g/L de sal. - Dia 1.

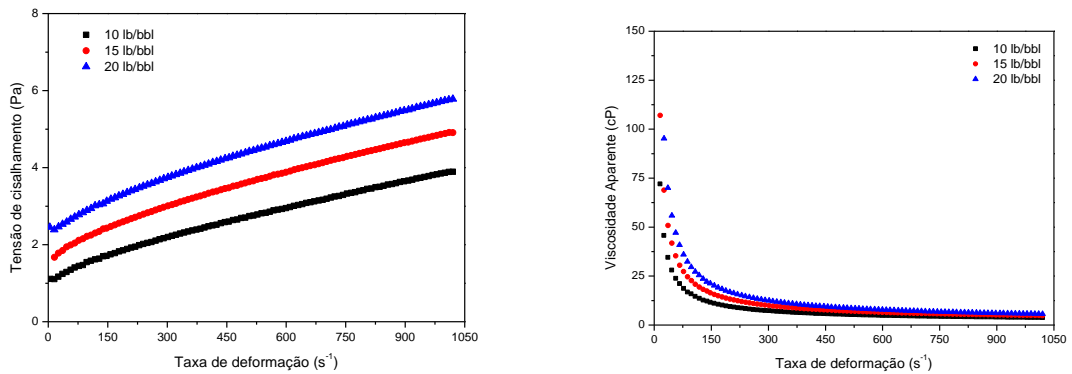


Figura 105. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 180 g/L de sal. - Dia 3.

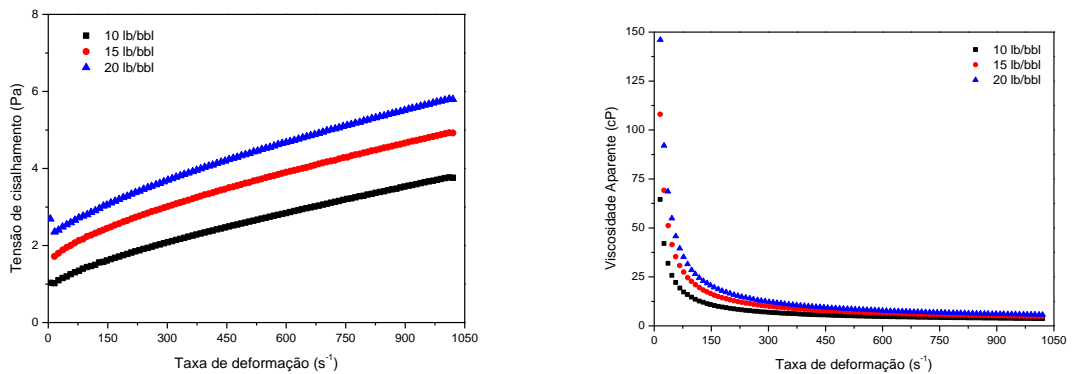


Figura 106. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 180 g/L de sal. - Dia 4.

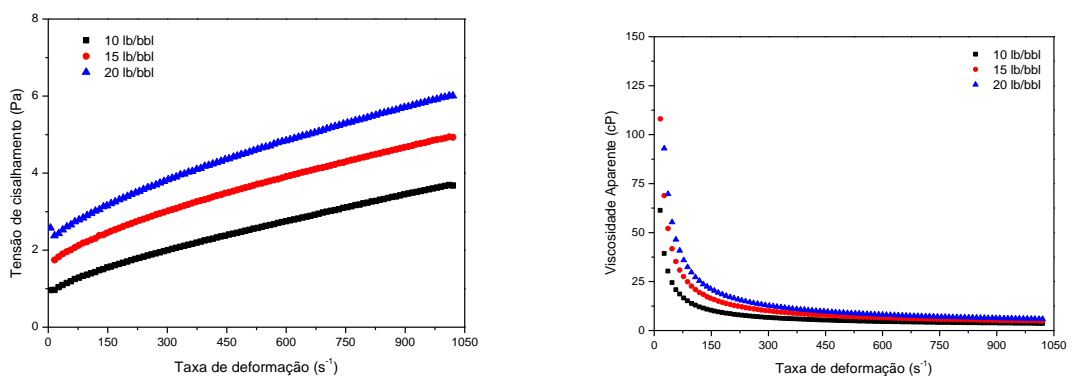


Figura 107. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 180 g/L de sal. - Dia 5.

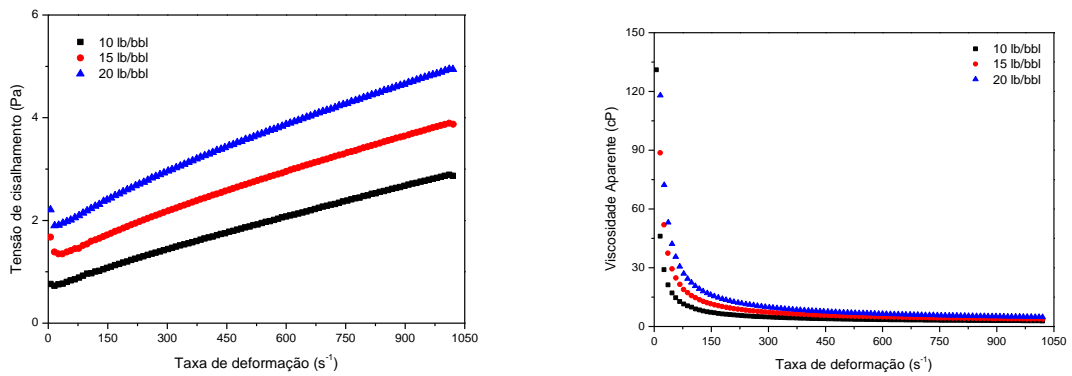


Figura 108. Efeito da concentração de bentonita na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 180 g/L de sal. - Dia 6.

5. Resultados do efeito da concentração de sal no fluido. Fluidos de 0 g/L, 32 g/L e 96 g/L com 10 lb/bbl de bentonita.

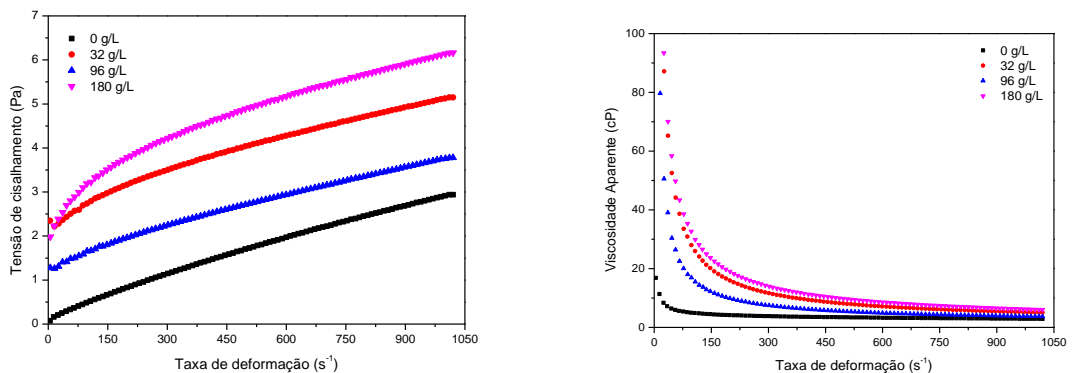


Figura 109. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 10 lb/bbl de bentonita. - Dia 1.

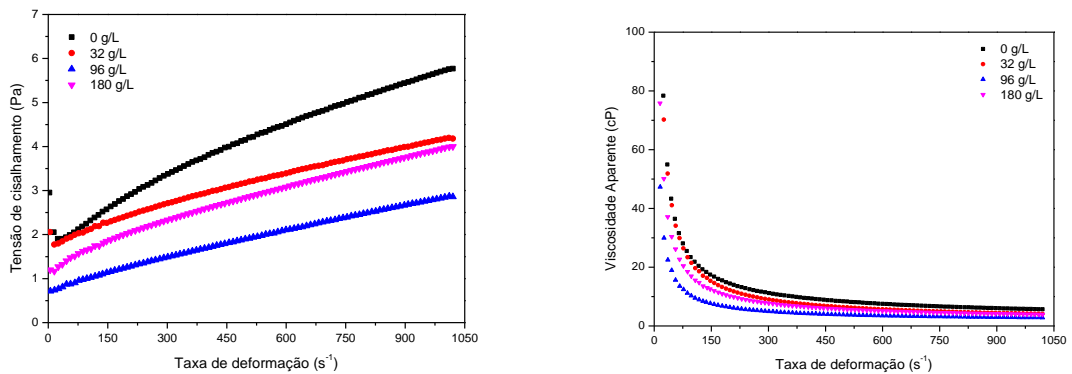


Figura 110. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 10 lb/bbl de bentonita. - Dia 3.

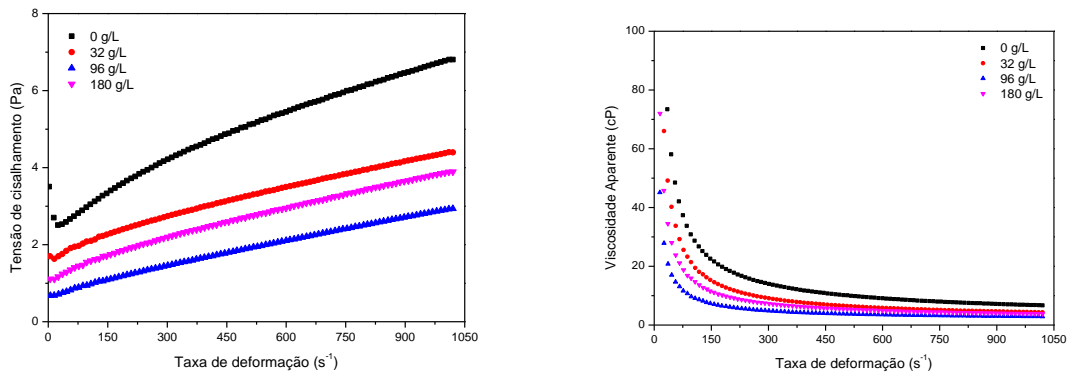


Figura 111. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 10 lb/bbl de bentonita. - Dia 4.

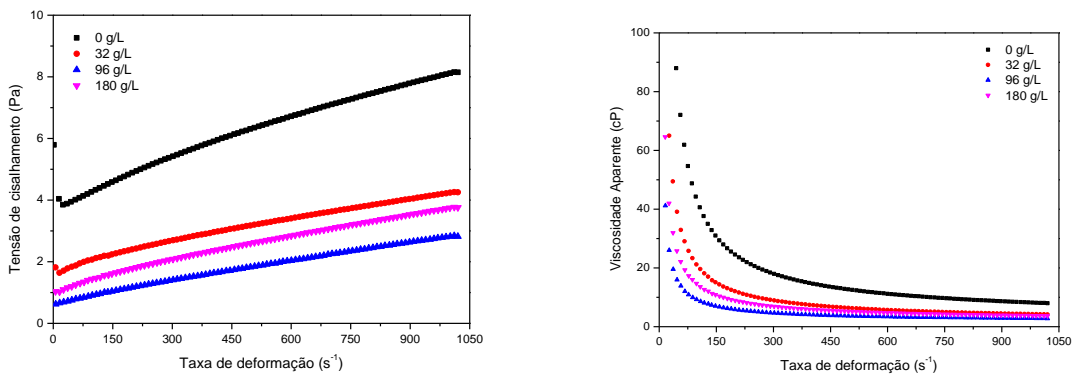


Figura 112. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 10 lb/bbl de bentonita. - Dia 5.

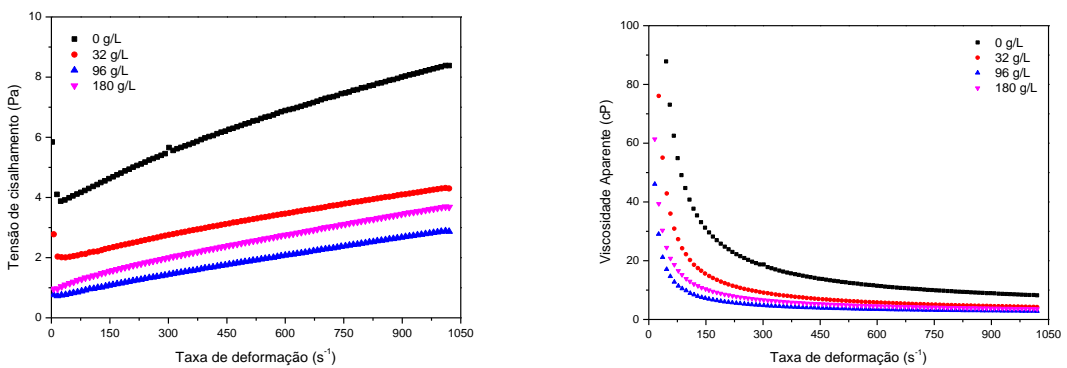


Figura 113. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 10 lb/bbl de bentonita. - Dia 6.

6. Resultados do efeito da concentração de sal no fluido. Fluidos de 0 g/L, 32 g/L e 96 g/L e 180 g/L com 15 lb/bbl de bentonita.

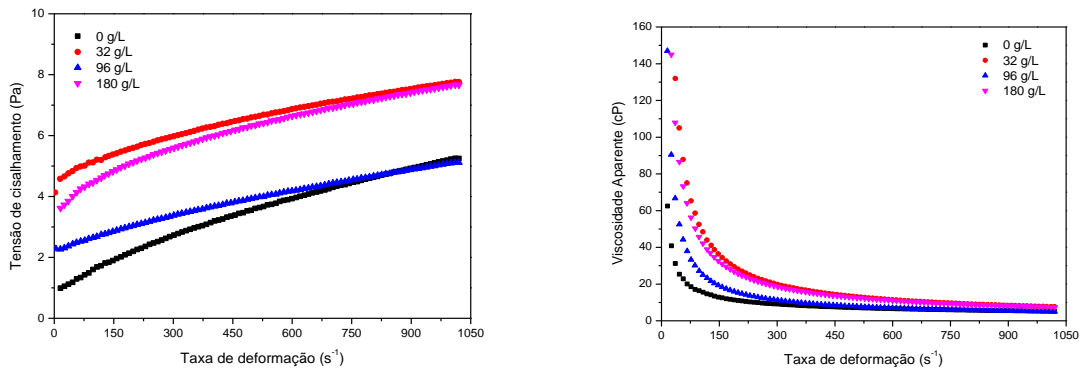


Figura 114. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 1.

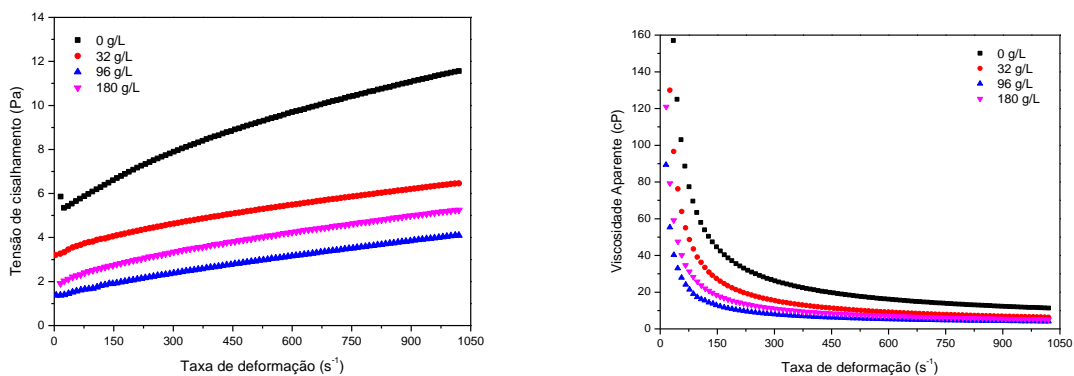


Figura 115. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 3.

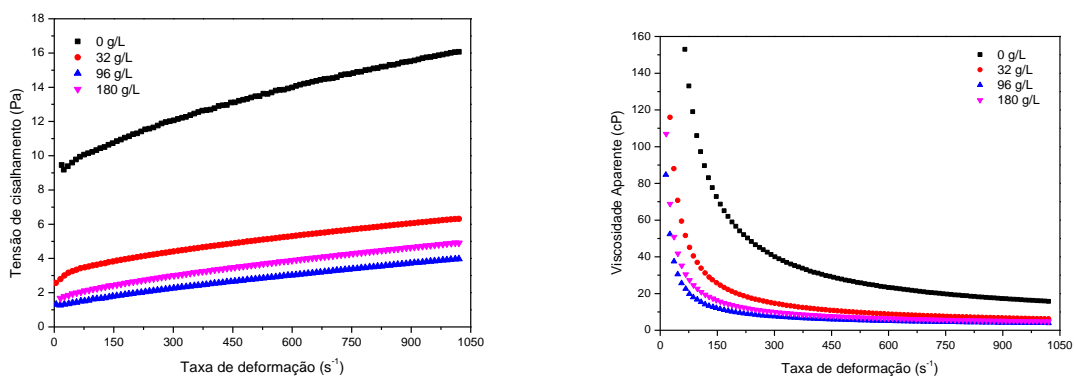


Figura 116. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 4.

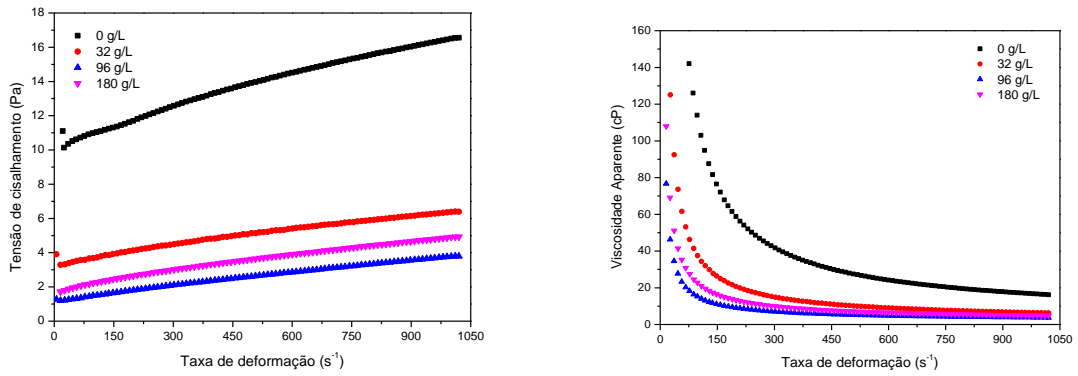


Figura 117. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 5.

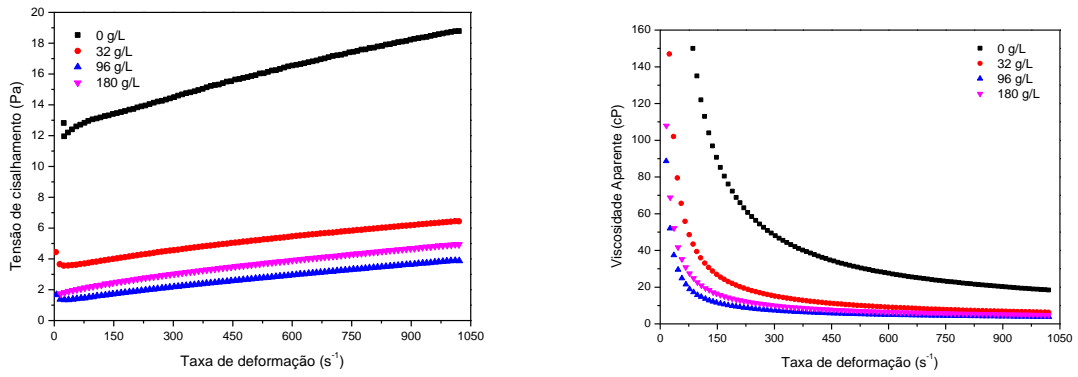


Figura 118. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 6.

7. Resultados do efeito da concentração de sal no fluido. Fluidos de 0 g/L, 32 g/L e 96 g/L e 180 g/L com 20 lb/bbl de bentonita.

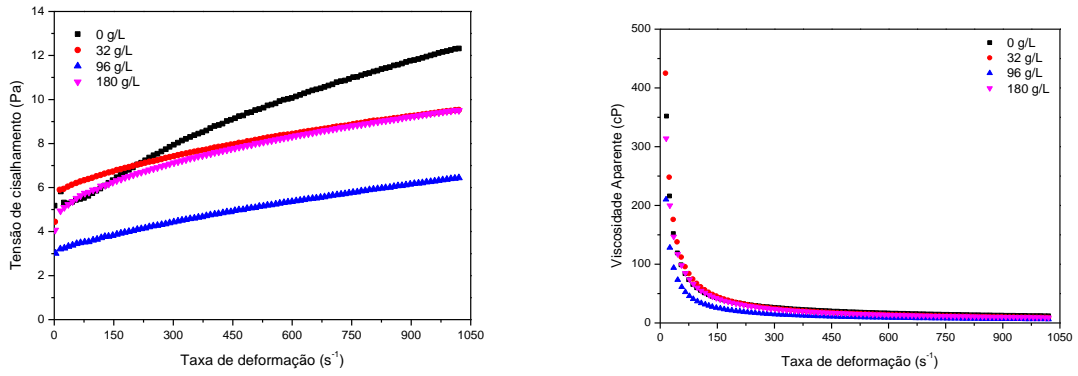


Figura 119. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 1.

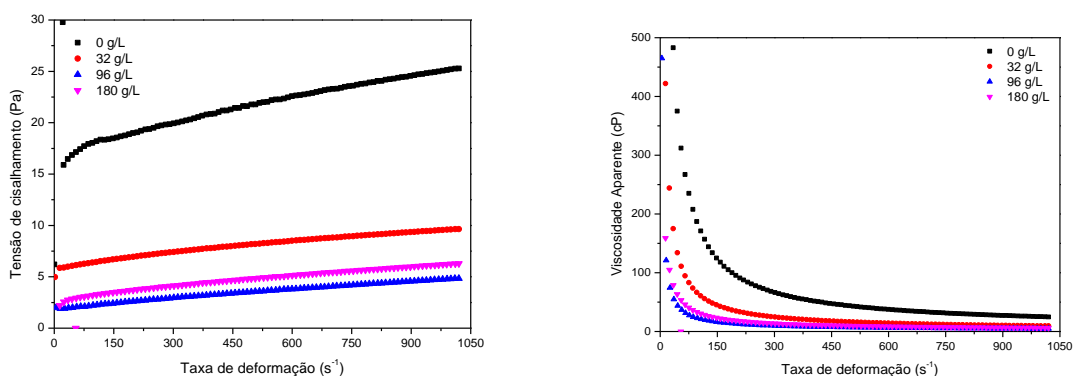


Figura 120. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 3.

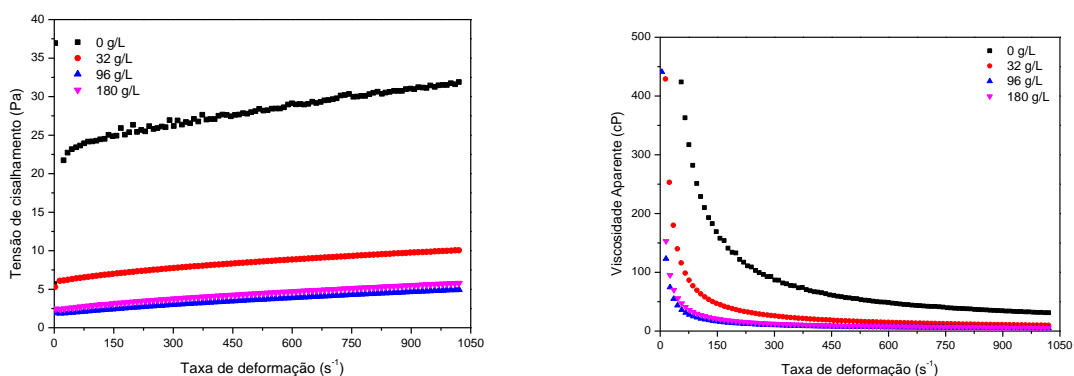


Figura 121. Efeito da concentração de sal a reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 15 lb/bbl de bentonita. - Dia 4.

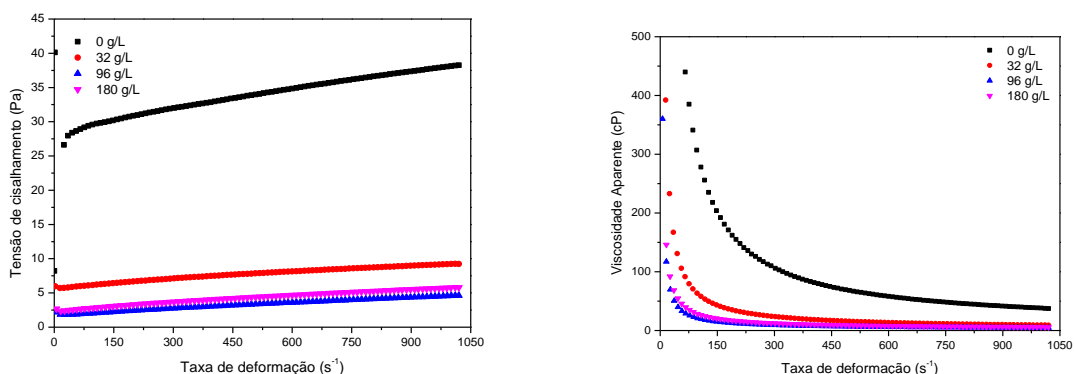


Figura 122. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 20 lb/bbl de bentonita. - Dia 5.

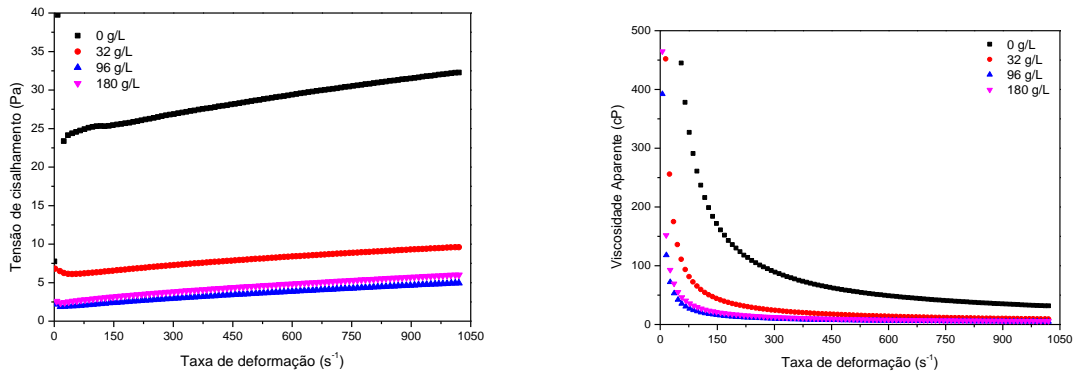


Figura 123. Efeito da concentração de sal na reologia, tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação e viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões com 20 lb/bbl de bentonita. - Dia 6.