

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DA ESTABILIDADE E DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE ÁGUA.

AUTORES:

Klismeryane Costa de Melo¹, Bárbara Borges Rosales¹, Afonso Avelino Dantas Neto¹, Eduardo Lins de Barros Neto¹, Tereza Neuma de Castro Dantas²

INSTITUIÇÃO:

¹UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Química, Campus Universitário, Lagoa Nova, CEP 59072-970, Natal – RN- Brasil.

²UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Química, Campus Universitário, Lagoa Nova, CEP 59072-970, Natal – RN- Brasil.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

ANÁLISE DA ESTABILIDADE E DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE ÁGUA.

Abstract

The determination of the rheology of drilling fluids is of fundamental importance to select the best composition and the best treatment to be applied in these fluids. This work presents a study of the rheological behavior of some additives used as viscosifiers in water-based drilling fluids. The evaluated additives were: Carboxymethylcellulose (CMC), Xanthan gum(GX), and Bentonite. The main objective was to rheologically characterize suspensions composed by these additives, by applying mathematical models for fluid flow behavior, in order to determine the best flow equation to represent the system, as well as the model parameters. The mathematical models applied in this research were: the Bingham Model, the Ostwald de Wale Model, and the Herschel-Bulkley Model. The rheological characterization was made through typical rheology experiments, using a coaxial cylinder viscosimeter, where the flow curves of each fluid was obtained. For each used additive the rheological behavior was evaluated as well as fluid stability as a function of the concentration and kind of additive used. The obtained results showed that the Ostwald de Waale model provided the best fit for fluids prepared using CMC and for fluids with Xanthan gum and Bentonite the best fit was given by the Herschel-Bulkley one.

Introdução

Em perfurações de poços se faz necessário manter a estabilidade dos mesmos durante a perfuração. O método utilizado para manter o poço estável é a utilização de fluidos especialmente desenvolvidos para tal atividade. Estes fluidos são chamados de fluidos de perfuração e são circulados dentro do poço ao longo de todo o processo, a fim de garantir condições favoráveis e seguras para o sucesso da operação.

Os fluidos de perfuração base água com baixo teor de sólidos ou poliméricos, são compostos por água, bentonita e polímeros. A argila contida nesse tipo de lama é pequena, pois o polímero, associado com a bentonita, reduz em 50% a quantidade de bentonita necessária para produzir alterações satisfatórias nas suas propriedades reológicas. Além disto, os polímeros floculam e envolvem os sólidos dispersos, resultando em uma remoção eficiente destes sólidos. O objetivo desse sistema é reduzir a quantidade de sólidos argilosos, pela combinação de mecanismos químicos e mecânicos, resultando em uma taxa elevada de penetração do fluido na rocha. Em compensação, sistemas dispersantes são usados para tolerar altas concentrações de sólidos argilosos através da desintegração química em finas partículas que normalmente mantêm a viscosidade com valores aceitáveis, mas que resulta em uma pequena taxa de penetração. (Lumus e Azar 1996, apud Duarte 2004).

Polímeros são usados em fluidos de perfuração desde o ano de 1930, quando foi introduzido como aditivo para controle de filtrações (perdas da fase contínua, isto é, da base água do fluido, em formações permeáveis). Desde então, os polímeros vêm se tornando cada vez mais especializados e sua aceitabilidade aumentando proporcionalmente. Atualmente os polímeros compõem grande parte dos sistemas a base de água nos dias de hoje. Com efeito alguns sistemas são totalmente dependentes dos polímeros e denominados apropriadamente de sistemas poliméricos (Pereira, 2008 a).

Em um sistema de circulação de fluido, o fluxo ocorre em uma variedade de taxas nas canalizações de tamanhos e de formas diferentes. No interesse de saber ou prever os efeitos deste fluxo é preciso saber o comportamento reológico do fluido nos vários pontos do interesse no sistema de circulação (Annis e Smith, 1996). O comportamento de fluxo de um fluido é definido pelos parâmetros reológicos. Estes são determinados considerando um modelo matemático particular, o qual influência diretamente no cálculo das perdas de carga na tubulação e velocidade de transporte dos cascalhos. Os modelos mais usuais são o de Newton, de Bingham ou plástico ideal, de Ostwald de Waale ou de potência e o de Herschel-Bulkley ou potência modificado (Machado, 2002b).

O fluido que será objetivo desta pesquisa será a base água e propõe-se o estudo da influência de três aditivos utilizados como viscosificantes em fluidos de perfuração, avaliando-se o desempenho de cada um deles nas propriedades reológicas e na estabilidade do fluido. Os aditivos estudados serão: Bentonita, Goma Xantana (GX) e o Carboximetilcelulose CMC. Pretende-se com este estudo, contribuir com informações científicas relacionados ao tema, visando construir um banco de dados a respeito desse tema que servirá de base para trabalhos futuros, bem como para aplicações tecnológicas

Metodologia

- Reagentes

Os aditivos empregados nesta pesquisa para formulação do sistema fluido foram; Bentonita, CMC (Carboximetilcelulose), GX (Goma Xantana), Calcita, Barita, Óxido de Magnésio, Polímero Catiônico e Cloreto de Sódio. Esses aditivos foram cedidos pela Petrobras - ATP-MO (Ativo de Produção de Mossoró) do Rio Grande do Norte.

- Preparação dos fluidos

Os fluidos foram preparados em um agitador Hamilton Beach, após a agitação, o viscosificante permanece em repouso por 24 horas para completa hidratação do polímero ou da argila; após as 24 horas; o sistema é levado para agitação e componentes normais do fluido de perfuração (adensantes, inibidores, alcalinizantes e outros) são adicionados para completar a composição. Os aditivos são adicionados um de cada vez com intervalos de cinco minutos de agitação para líquido e dez minutos para sólidos. Com o termino do preparo espera-se que o mesmo atinja a temperatura ambiente para realização das análises de reologia filtração e estabilidade.

A Tabela 1 apresenta os valores de concentração dos aditivos viscosificantes (polímeros e argilas) utilizados no preparo do fluido.

Tabela 1. Concentração dos viscosificantes utilizados na preparação dos fluidos

Viscosificante	Quantidade (%)
CMC	0,17 – 0,34 – 0,6 – 0,68 – 0,77 – 0,85 – 1,03 – 1,37 – 1,71
GX	0,11 – 0,17 – 0,22 – 0,28 – 0,34 – 0,68 – 0,85 – 1,03 – 1,37 – 1,71
Bentonita	2,0 – 3,0 – 4,0 – 5,0

– Ensaios reológicos

O método utilizado para obtenção dos parâmetros reológicos é o sistema de cilindros coaxiais, onde um volume de 12 mL de amostra é cisalhada entre as paredes dos cilindros de raio R0 e R1. As curvas de fluxo foram obtidas pelo método CR (taxa de cisalhamento controlada) no intervalo de 1 a 1050 s⁻¹. Os ensaios de reologia foram obtidos a temperatura ambiente (25°C) para todos os fluidos formulados com as concentrações da Tabela 1. Foram preparados 9 fluidos com diferentes concentrações de CMC, 10 fluidos com diferentes concentrações de GX, 4 fluidos com diferentes concentrações de bentonita.

Os dados analisados pelo Reômetro Mars, são enviados para um computador acoplado ao equipamento. Um software, do próprio equipamento, gera os reogramas de tensão por taxa de cisalhamento e tixotropia, aplica os modelos matemáticos de acordo com a escolha do operador e calcula o valor de tixotropia por histerese.

– Ensaio de estabilidade

Os ensaios de estabilidade foram realizados no analisador de estabilidade e tamanho de partícula. O resultado é obtido através de um sistema óptico que trabalha em conjunto com um transmissor e um receptor de infravermelho próximo (NIR) capaz de registrar espectros de transmissão de NIR ao longo de uma cubeta, em função do tempo. O sistema óptico está acoplado a uma centrífuga que possibilita o aumento da força gravitacional durante o registro de espectros de transmissão de NIR. Dessa forma, é possível observar uma eventual separação e sedimentação (até aproximadamente 2300 vezes mais rápido do que nos testes convencionais).

Resultados e Discussão

- Estudo reológico do Carboximetilcelulose (CMC)

Nas Figuras 1 (A) e (B) encontram-se, respectivamente, as curvas de fluxo e as viscosidades para todos os fluidos preparados com CMC.

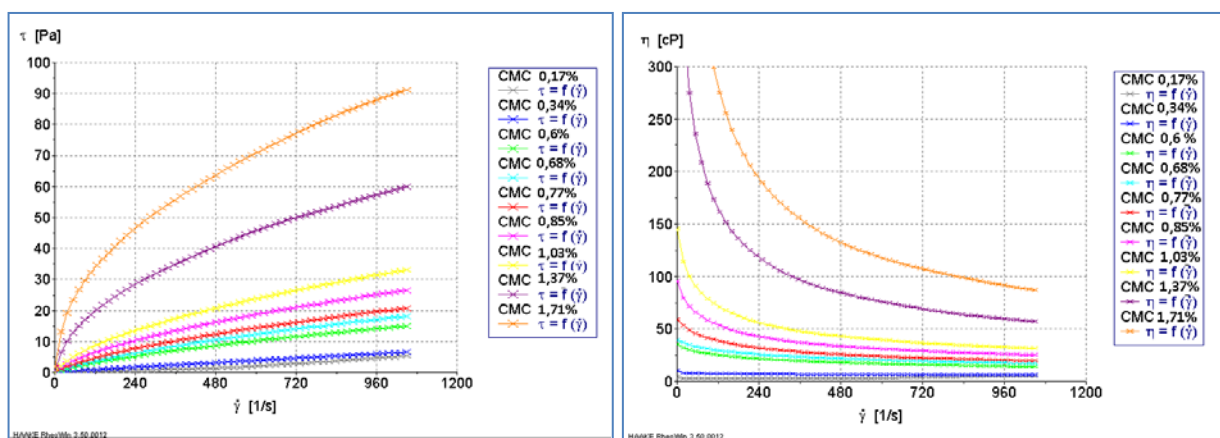


Figura 1. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de CMC no meio respectivamente.

Os fluidos preparados com CMC apresentaram comportamento não-newtoniano como pode ser observado na Figura 1 (A), na qual a relação de tensão cisalhante por taxa de cisalhamento não é constante. Isto ocorreu para todas as concentrações de CMC estudadas.

A viscosidade do fluido aumenta com o aumento da concentração de CMC no meio e diminui com o aumento da taxa de cisalhamento (Figura 1 (B)), caracterizando este polímero como agente modificador reológico com características pseudoplásticas, tornando-o um aditivo de grande interesse para aplicação em fluidos de perfuração. A perda de viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento deve-se ao fato das partículas dispersas nos sistemas pseudoplásticos, em repouso, estarem de forma irregular (placas planares, filamentos e gotas), proporcionando ao fluido uma alta resistência ao fluxo caracterizada pela alta viscosidade. Com o aumento do cisalhamento essas partículas se orientam linearmente na direção do fluxo, diminuindo assim sua viscosidade.

Ainda na Figura 1 (A), pode-se observar que os reogramas tendem para a origem dos eixos, isso mostra que os fluidos preparados com CMC não oferecem resistência ao fluxo inicial, ou seja, limite de escoamento igual ou muito próximo de zero. O fator chave para esse comportamento são as forças interpartículas e/ou intermoleculares fracas, formadas nas dispersões de CMC.

Foram aplicados os modelos de Bingham e de Ostwald de Waale, a fim de verificar as suas aplicabilidades no comportamento reológico destas dispersões poliméricas.

A modelagem matemática foi realizada para todas as concentrações de CMC estudadas (Tabela 1). Os valores dos parâmetros dos modelos aplicados e os valores de coeficiente lineares de todos os fluidos preparados com CMC estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Ostwald Waale e Bingham para os fluidos preparados com CMC.

Concentração de CMC (%)	Modelo de Bingham		Coeficiente Linear	Modelo de Ostwald de Waale		Coeficiente Linear
	$\tau = \mu_P + \tau_L$			$\tau = K(\gamma)^n$		
	Parâmetros			Parâmetros		
	μ_P	τ_L	R	n	K	R
0,17	0,005024	0,5544	0,9750	1,613	7,155e-05	0,9967
0,34	0,006091	0,1687	0,9997	0,9275	0,01024	0,9999
0,6	0,013350	1,7180	0,9919	0,7183	0,1017	0,9998
0,68	0,016300	1,9720	0,9923	0,7295	0,1143	0,9997
0,77	0,018150	2,8480	0,9898	0,6786	0,1858	0,9998
0,85	0,022820	4,1350	0,9878	0,6474	0,295	0,9998
1,03	0,028000	5,8130	0,9850	0,6474	0,4586	0,9998
1,37	0,047020	15,000	0,9739	0,5116	1,716	0,9998
1,71	0,068310	26,530	0,9694	0,4631	3,658	0,9999

Os reogramas dos fluidos preparados com CMC partem da origem dos eixos, indicando que o valor do limite de escoamento inicial (τ_L) é zero ou próximo de zero. Na Tabela 2 verifica-se que os valores de τ_L calculados pelo modelo de Bingham, com exceção dos fluidos preparados com 0,17 e 0,34 % de CMC apresentaram valores entre 1,7 e 26,530, afastando-se significativamente do limite de escoamento real à medida que a concentração de CMC aumentou no sistema fluido. A viscosidade plástica obtida pelo modelo de Bingham aumentou com o aumento da concentração, isso caracteriza o aumento na quantidade de partículas no sistema, acarretando atrito entre as partículas dispersas e as moléculas de água, aumentando a resistência ao escoamento com o aumento da concentração do CMC no meio.

- Estudo reológico da Goma Xantana (GX)

Os fluidos preparados com GX apresentaram comportamento não Newtoniano como pode ser observado na Figura 2 (A), onde a relação de tensão cisalhante por taxa de cisalhamento não é constante para as concentrações de GX estudadas. Observa-se também que o aumento da concentração de GX no meio oferece ao fluido um acréscimo no limite escoamento inicial. Devido à presença significativa do valor de limite de escoamento, nos fluidos preparados com GX, será aplicado o modelo de Herschell-Bulkley além do modelo de Bingham e o de Ostwald de Waale.

Na Figura 2 (A) e (B) encontram-se, respectivamente, as curvas de fluxo e as viscosidades para todos os fluidos preparados com GX.

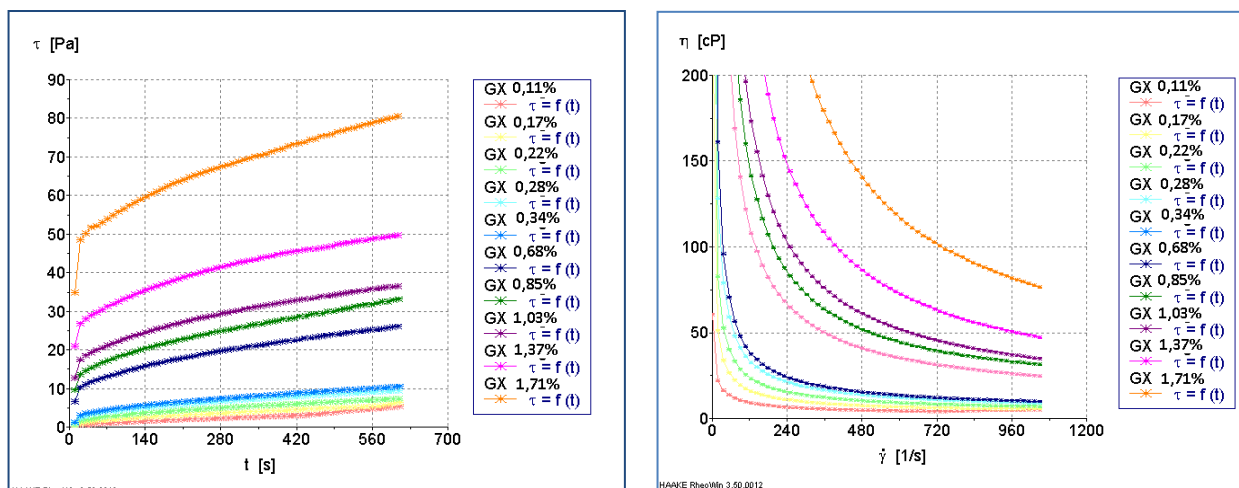


Figura 2. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de GX no meio respectivamente.

A viscosidade do fluido aumenta com o acréscimo da concentração de GX no meio e diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, Figura 2 (B) o que caracteriza, respectivamente, este polímero como agente modificador reológico com características pseudoplasticas, fazendo deste polímero um aditivo bastante utilizado em formulações de fluidos de perfuração. Em contra partida ao observado nos fluidos preparados com CMC, em relação ao limite de escoamento, a GX apresentou este parâmetro com bastante evidência, aumentando com o aumento da concentração deste polímero no meio. Isto mostra que as interações intramoleculares da GX são bem mais fortes que a do CMC.

A modelagem matemática foi realizada para todas as concentrações de GX, mostradas na Tabela 1, os resultados para a GX serão mostrados conforme os resultados de CMC foram apresentados. Os valores dos parâmetros dos modelos aplicados e os valores de coeficiente lineares de todos os fluidos preparados com GX serão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham de Ostwald Waale e Herschell-Bulkley para os fluidos preparados com CMC.

Modelo de Bingham			Modelo de Ostwald de Waale			Modelo de Herschell-Bulkley				
$\tau = \mu_p + \tau_L$			$\tau = K(\dot{\gamma})^n$			$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$				
Parâmetros			Parâmetros			Parâmetros				
μ_p	τ_L	R	n	K	R	τ_0	K	n	R	
11	0,004193	0,4271	0,9819	0,8412	0,01373	0,9747	0,8069	0,00034	1,353	0,9858
17	0,004385	1,403	0,9874	0,5211	0,1502	0,9933	0,5501	0,06577	0,6263	0,9967
22	0,0052	2,263	0,9796	0,4385	0,3407	0,9978	1,09	0,1046	0,5876	0,9997
28	0,00629	3,32	0,9754	0,3898	0,6131	0,9973	1,032	0,2951	0,4797	0,999
34	0,00674	3,876	0,9775	0,3688	0,7823	0,995	1,588	0,278	0,4957	0,9984
58	0,01457	11,92	0,9773	0,2861	3,447	0,9884	7,019	0,5852	0,4994	0,9991
85	0,01767	15,62	0,9807	0,2679	4,908	0,9834	10,36	0,5578	0,5304	0,9987
03	0,01759	19,81	0,9705	0,2202	7,686	0,9845	14,37	0,6325	0,5124	0,9998
37	0,02116	29,76	0,9663	0,181	13,75	0,9799	20,32	1,484	0,4298	0,9992
1	0,03007	51,3	0,9639	0,1503	27,21	0,9767	44,96	0,6118	0,5835	0,9997

O modelo de Herschell-Bulkley se adequou melhor que o modelo de Bingham e o modelo de Ostwald de Waale para todas as concentrações de GX estudadas, com exceção do fluido preparado com 0,11%, o coeficiente linear apresentou valores entre 0.9967 e 0.9998 para todo intervalo de taxa de cisalhamento (1-1050s⁻¹). Ainda com exceção do fluido preparado com 0,11% de GX, o índice de comportamento calculado pelo modelo Herschell-Bulkley mostra que à medida que se aumenta a concentração de GX no meio, o comportamento do fluido se afasta do comportamento Newtoniano ($n = 1$), se comportando como pseudoplástico, $0 < n < 1$. O índice de consistência aumenta com o aumento da concentração deste polímero, indicando um maior grau de resistência ao fluxo para concentrações mais altas de GX.

- Estudo da estabilidade de fluidos

Um parâmetro tão importante quanto os reológicos para um fluido de perfuração, é a estabilidade, que mostra quanto um sistema permanece macroscopicamente homogêneo durante o tempo. Este parâmetro está diretamente relacionado com o armazenamento desses fluidos até a sua utilização. Neste trabalho foram estudados os fluidos aditivados com CMC, GX e Bentonita.

- Fluidos aditivados com Goma Xantana

A Figura 3 (I) e (II) mostram os resultados da transmitância da luz em função do tempo, caracterizando a resistência à centrifugação, de uma força igual a 1000 rpm, durante 55 minutos, para fluidos preparados com 0,17 e 0,34 % de GX.

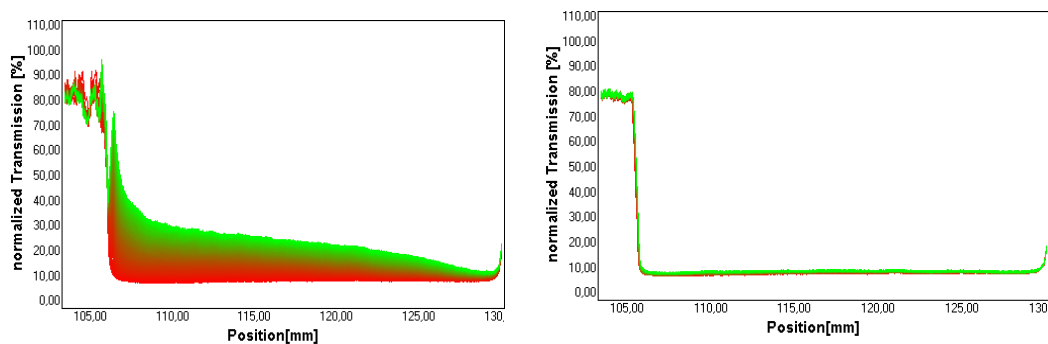


Figura 3. Curva de porcentagem de transmissão em função da posição da amostra preparada com 0,17 e 0,34 % GX respectivamente.

A análise das Figuras 3 (I) e (II) permite observar que a estabilidade do sistema aditivado com GX é atingida com uma concentração de 0,34%. A partir desta concentração a estabilidade do sistema se comportou de modo semelhante, esses gráficos foram omitidos deste trabalho devido a semelhança em seu comportamento. A GX promove estabilidade ao sistema em baixas concentrações, se comparado com o CMC, isso se deve ao seu alto poder viscosificante.

O fluido preparado com 0,34 % de GX se mostrou mais resistente ao processo de centrifugação sendo mais estável gerando uma viscosidade, aproximada, de 23 cP, em uma taxa de cisalhamento igual a 240 s⁻¹, nesta concentração, o suficiente para sustentar os sólidos finos que compõem o fluido, garantindo estabilidade ao sistema.

- Fluidos aditivados com CMC

A Figura 4 (I), (II) e (III) mostram os resultados da transmitância da luz em função do tempo, caracterizando a resistência à centrifugação, de uma força igual a 1000 rpm, durante 55 minutos, para fluidos preparados com 0,17 – 0,85 e 1,03% de CMC em 350 mL de água.

Analisando as Figuras 4 (I), (II) e (III), pode ser observado que com o aumento da concentração de CMC a estabilidade do fluido aumenta. O fluido preparado com 0,17 % de CMC, em 350 mL de água, apresentou clarificação ao longo do comprimento total da cubeta, indicando a separação das fases e a instabilidade do sistema. Isto é justificado pela baixa concentração de CMC no meio, impossibilitando

o polímero de formar redes estruturadas para conferir viscosidade ao fluido. O fluido preparado com 0,85% de CMC se mostrou mais resistente ao processo de centrifugação conferindo uma melhor estabilidade ao sistema, porém o fluido aditivado com 1,03% de CMC foi o mais estável e gerou uma viscosidade, aproximada, de 40 cP, em uma taxa de cisalhamento igual a 240 s⁻¹, o suficiente para sustentar os sólidos finos que compõem o fluido, garantindo estabilidade ao sistema.

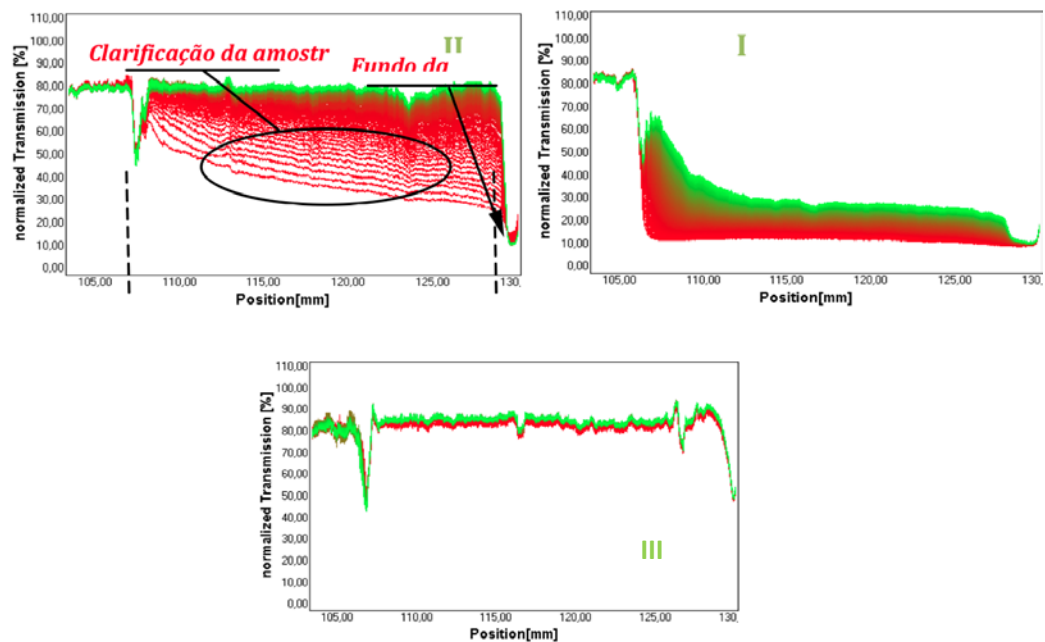


Figura 4. Curva de porcentagem de transmissão em função da posição da amostra preparada com 0,17 (I), 0,85(II) e 1,03% de CMC.

- Estudo da estabilidade de fluidos preparados com Bentonita

A Figura 5 (I), (II) e (III) mostra que as amostras estudadas apresentaram um comportamento instável, onde a separação de fases ocorreu nos primeiros 8 minutos de centrifugação, para todas as concentrações estudadas.

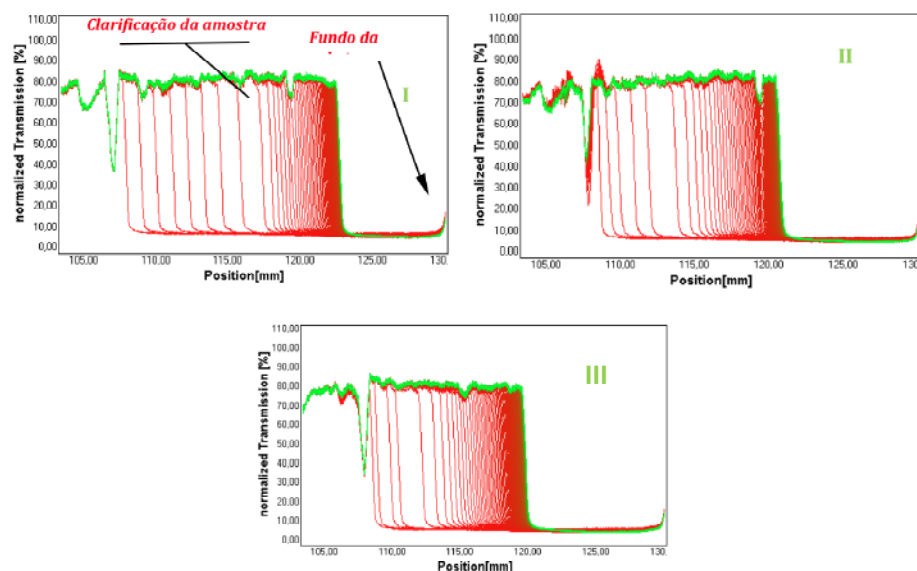


Figura 5. Curva de porcentagem de transmissão em função da posição da amostra preparada com 2% (I), 3% (II) e 4% (III) de bentonita.

O sistema bentonita/água se mostrou instável, para as concentrações estudadas, isso pode ser constatado nas Figuras 5.19, onde a separação das fases é indicada pela clarificação da parte superior da amostra. A parte inferior da cubeta é composta por camadas de bentonita hidratada, isso justifica o volume acumulado no fundo da cubeta ser maior que o percentual de bentonita no sistema.

Conclusões

Os viscosificantes estudados foram o CMC, a GX e a bentonita. Para a caracterização reológica foram aplicados os seguintes modelos: modelo de Bingham, modelo de Ostwald Waale, modelo de Herschell-Bulkley

A GX, dentre os viscosificantes estudados, é o aditivo que propicia melhor viscosidade ao fluido de perfuração.

A estabilidade está diretamente relacionada com a viscosidade adquirida pelo sistema.

O limite de escoamento é propriedade presente em sistemas contendo viscosificantes que tem baixo poder de interação com a água, o que é comprovado pelo modelo de Ostwald de Waale representar sistemas contendo CMC, enquanto que o de Herschell-Bulkley representa os sistemas contendo GX e Bentonita.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis – convênio ANP-PRH14, pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

DUARTE, R. G. Avaliação da Interação Folhelho-Fluido de Perfuração para estudo de Estabilidade de Poço. Junho de 2004. Dissertação (Mestrado). Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.

LUMMUS, J.L.; AZAR, J.J., *Drilling Fluids Optimization A Practical Field Approach*, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1986.

MACHADO, J. C. V. *Reologia e Escoamento de Fluidos - Ênfase na Indústria do Petróleo*, ed. Interciência, 2002.

PEREIRA, E. *Química dos Polímeros e Aplicações – Parte I*, Disponível em: www.systemmud.com.br, Acesso em: 10 de janeiro, 2008.

SCHRAMM, G. *A Practical Approach to Rheology and Reometry*. 2ª Ed. Gebreeder HAAKE GmbH, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 1998.