



Programa de
Recursos
Humanos

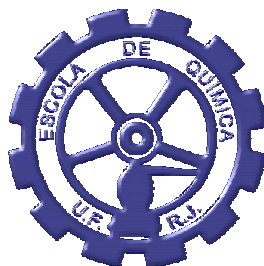


anp
Agência
Nacional do
Petróleo



PROGRAMA EQ-ANP

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria
do Petróleo e Gás Natural**



Gelificação de Fluidos de Perfuração em Poços de Lâmina Profunda de Água

Fernando Pessanha Feitosa

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof^a. Verônica Maria de Araújo Calado, Ph.D.

André Leibsohn Martins, D.Sc.

Setembro de 2009

Gelificação de fluido de perfuração em poços de lâmina profunda de água

Fernando Pessanha Feitosa

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Engenharia de Petróleo.

Aprovado por:

Christine Rabello Nascimento, D.Sc.
(CETEM)

Luiz Antônio Pires Fernandes Júnior, Ph.D.
(EQ-UFRJ)

Roni Abensur Gandelman, Engenheiro Químico
(PETROBRAS)

Orientado por:

André Leibsohn Martins, D.Sc.
(PETROBRAS)

Verônica Maria de Araújo Calado, Ph.D.
(EQ-UFRJ)

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2009

Ficha Catalográfica

Feitosa, Fernando Pessanha.

Gelificação de fluido de perfuração em poços de lâmina profunda de água / Fernando Pessanha Feitosa. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

xiv, 52 p.; il.

(Projeto) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.

Orientadores: Prof^ª. Verônica Maria de Araújo Calado e André Leibsohn Martins.

1. Fluido de Perfuração. 2. Reologia. 3. Gelificação. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Prof^ª. Verônica Maria de Araújo Calado e André Leibsohn Martins. I. Gelificação de fluido de perfuração em poços de lâmina profunda de água.

Dedico este Projeto aos meus pais, à minha namorada e à minha irmã.

“Os sonhos são gratuitos. Transformá-los em realidade têm um preço”.

(E. J. Gibbs)

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da **Agência Nacional do Petróleo – ANP** – e da **Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP** – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao PRH 13, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Aos meus orientadores André Leibsohn Martins e Prof^ª. Verônica Maria de Araújo Calado, pela orientação, apoio e pela oportunidade de realização desse trabalho.

Aos amigos do LMSCP e do LABTeR pelo convívio, amizade e companheirismo.

Ao Prof. Márcio Nele pelo incentivo e pelas valiosas discussões que muito contribuíram para a realização desse trabalho de pesquisa.

À Prof^ª. Saraí pelo companheirismo, incentivo, dedicação, confiança e paciência demonstrados para comigo ao longo de todo o desenvolvimento dos trabalhos de monitoria e pesquisa realizados no Instituto de Química da UFRJ.

À minha namorada Marcella, que sempre me aconselha e incentiva nos momentos de dificuldades e dúvidas, além de todo amor, carinho e motivação que muito contribuíram para que esse momento fosse possível.

À família da minha namorada, em especial Dona Angela, pelo apoio, carinho e dedicação. E também ao irmão mais novo da minha namorada, Victor pelo apoio e amizade.

Ao meu pai, pela confiança e compreensão ao longo de toda essa jornada, e sem o qual esse sonho não seria possível. À minha mãe que há muito se foi, pois esse momento era um sonho para ela.

E claro, a Deus.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Engenharia de Petróleo.

GELIFICAÇÃO DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO EM POÇOS DE LÂMINA PROFUNDA DE ÁGUA

Fernando Pessanha Feitosa
Setembro, 2009

Orientadores: Prof^a. Verônica Maria de Araújo Calado, D.Sc.
André Leibsohn Martins, D.Sc.

Muitos fluidos na perfuração de poços de petróleo devem possuir propriedades de gelificação para manter em suspensão os sólidos gerados pela broca quando o bombeio é interrompido. Por outro lado, gelificação excessiva pode gerar picos de pressão indesejáveis quando a circulação é retomada, o que traz riscos à operação. As perfurações de poços em lâmina d'água profunda e ultraprofunda apresentam um desafio adicional uma vez que o fluido será submetido a elevadas variações de pressão e de temperatura durante a sua circulação da superfície até o fundo do poço. O presente trabalho propõe avaliar a aplicação de diversos ensaios reológicos para representar a gelificação dos fluidos nas condições do fundo do mar, e com isso, obter uma melhor compreensão do fenômeno para desenvolver uma metodologia a ser usada em campo para impedir o aparecimento de picos de pressão excessivamente grandes na retomada da circulação. Uma vez estabelecidos os procedimentos, foi avaliada a gelificação do sistema de fluido em diferentes tempos de parada (representando conexões, manobras curtas e completas). Os resultados mostraram uma grande influência da temperatura no processo de formação do gel e nos picos de viscosidade. Em menor grau, o tempo de repouso também influenciou nos picos de viscosidade observados. Foi obtida uma repetitividade das curvas de viscosidade versus taxa de cisalhamento antes e após a gelificação, indicando que o fluido recupera suas propriedades após o repouso.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineering with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Refining and Processing.

GELATION OF DRILLING FLUIDS IN DEEPWATER WELLS

Fernando Pessanha Feitosa
September 2009

Supervisors: Prof^ª. Verônica Maria de Araújo Calado, D.Sc.
André Leibsohn Martins, D.Sc.

During drilling operations many fluids must present gelation properties to maintain in suspension particle solids generated by the drill when the pumping is interrupted. However, excessive gelation can cause undesirable pressure peaks when the circulation is retaken, what promotes operational risks. Well drilling in deep and ultra deepwater presents an additional challenge as the fluid will be submitted to high pressure and temperature variations during its circulation from the surface to the bottom of the well. This work is aimed to evaluate the application of several rheological experiments in order to represent the gelation of the fluids in deepwater conditions. Thus, we can obtain a better understanding of the phenomenon in order to develop a methodology to be used in fields to prevent the emergence of huge pressure peaks when the circulation is retaken. Once the procedures are established, it was evaluated the gelation of the fluid system in different stop times (corresponding to connections, short and complete maneuvers). The results have shown a great influence of the temperature on the gel formation process and the viscosity peaks. In a lower importance, the resting time also influences on the viscosity peaks. Repeatability of the viscosity versus shear rate curves was obtained before and after gelation, indicating that the fluids properties are recovered.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO.....	2
2.1.1. Histórico.....	2
2.1.2. Conceitos básicos.....	4
2.1.3. Classificação dos fluidos de perfuração.....	6
2.2. GELIFICAÇÃO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO.....	8
3. COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS FLUIDOS.....	9
3.1. CONCEITOS BÁSICOS.....	9
3.1.1. Reologia.....	9
3.1.2. Tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.....	9
3.1.3. Viscosidade.....	11
3.1.4. Curvas de viscosidade e de tensão cisalhante.....	13
3.1.5. Fluidos Newtonianos.....	14
3.1.6. Fluidos Não-Newtonianos.....	15
3.2. PROPRIEDADES REOLÓGICAS.....	18
3.2.1. Viscosimetria e reometria.....	18
3.2.2. Escolhendo o melhor sistema de medição.....	20
3.2.2.1. Cilindros concêntricos.....	21
3.2.2.2. Cone-placa.....	22
3.2.2.3. Placas paralelas.....	23
3.2.3. Viscoelasticidade.....	25
3.2.4. Testes oscilatórios ou dinâmicos.....	26
3.2.5. Propriedades reológicas dos fluidos de perfuração.....	27
4. OBJETIVO.....	28
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
5.1. FLUIDO DE PERFURAÇÃO.....	29
5.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	29
5.2.1. Determinação do intervalo de viscoelasticidade linear.....	29
5.2.2. Metodologia de 5 etapas.....	30
5.2.3 Homogeneização da amostra.....	32
5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	33
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
6.1. EFEITO DA TEMPERATURA.....	34
6.2. EFEITO DO TEMPO DE REPOUSO.....	40
6.3. EFEITO DA HOMOGENEIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	44
7. CONCLUSÃO.....	47
8. SUGESTÕES.....	49
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS PRINCIPAIS FUNÇÕES DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	5
FIGURA 2: FLUIDO VISCOSO ENTRE PLACAS, CISALHADO POR UMA FORÇA APLICADA NA PLACA SUPERIOR	11
FIGURA 3: REOGRAMA	14
FIGURA 4: CURVA DE VISCOSIDADE	14
FIGURA 5: COMPORTAMENTOS DE ESCOAMENTOS INDEPENDENTES DO TEMPO: (1) NEWTONIANO, (2) PSEUDOPLÁSTICO, (3) DILATANTE E (4) PLÁSTICO DE BINGHAM	17
FIGURA 6: CURVAS DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS COM PROPRIEDADES DEPENDENTES DO TEMPO DE CISALHAMENTO	18
FIGURA 7: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO REÔMETRO ROTACIONAL TIPO SEARLE (CILINDRO CONCÊNTRICO, CONE-PLACA E PLACA-PLACA)	19
FIGURA 8: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO REÔMETRO ROTACIONAL TIPO COUETTE (CILINDRO CONCÊNTRICO, CONE-PLACA E PLACA-PLACA)	19
FIGURA 9: GEOMETRIA CILINDROS CONCÊNTRICOS COM AMOSTRA CORRETAMENTE CARREGADA	22
FIGURA 10: GEOMETRIA CONE-PALCA COM AMOSTRA CORRETAMENTE CARREGADA	22
FIGURA 11: GEOMETRIA PLACAS PARALELAS COM AMOSTRA CORRETAMENTE CARREGADA	24
FIGURA 12: REÔMETRO ARG2	30
FIGURA 13: FLUXOGRAMA COM A METODOLOGIA APLICADA	32
FIGURA 14: G' E G'' EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM DIVERSAS TEMPERATURAS	34
FIGURA 15: RAMPAS DE CISALHAMENTO EM DIVERSAS TEMPERATURAS ANTES E APÓS O TEMPO DE REPOUSO	35
FIGURA 16: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA FORMAÇÃO DO GEL	36
FIGURA 17: COMPORTAMENTO DA VISCOSIDADE APARENTE APÓS O TEMPO DE REPOUSO	37
FIGURA 18: ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EFEITO DA TEMPERATURA NA ETAPA 4	39
FIGURA 19: ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EFEITO DA TEMPERATURA NA ETAPA 5	39

FIGURA 20: RAMPAS DE CISALHAMENTO ANTES E APÓS DIVERSOS TEMPOS DE REPOUSO	40
FIGURA 21: COMPORTAMENTO DA VISCOSIDADE APARENTE APÓS OS TEMPOS DE REPOUSO	41
FIGURA 22: ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EFEITO DO TEMPO DE REPOUSO NA ETAPA 4, A 40°C	43
FIGURA 23: ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EFEITO DO TEMPO DE REPOUSO NA ETAPA 5, A 40°C	43
FIGURA 24: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA HOMOGENEIZAÇÃO DA AMOSTRA NA FORMAÇÃO DO GEL: TEMPO DE REPOUSO DE 10 MINUTOS	45
FIGURA 25: COMPORTAMENTO DA VISCOSIDADE APARENTE APÓS O TEMPO DE REPOUSO	46
FIGURA 26: RAMPA DE CISALHAMENTO APÓS DIVERSOS TEMPOS DE REPOUSO	47

1. Introdução

Uma das principais funções dos fluidos de perfuração é o transporte de sólidos gerados pela broca até a superfície. Dentre as inúmeras características que se espera de um fluido de perfuração, algumas delas estão direta ou indiretamente relacionadas com as suas propriedades reológicas. Os fluidos devem apresentar baixa viscosidade em altas vazões, para reduzir ao máximo as perdas de carga, e altas viscosidades em baixas vazões, para não prejudicar a capacidade de carrear os sólidos mesmo em velocidades baixas. Entretanto, paradas de bomba ocorrem com bastante frequência durante a perfuração de um poço, tornando desejável o fenômeno de gelificação (Gandelman, 2006).

As perfurações de poços em lâmina d'água profunda e ultraprofunda apresentam um desafio adicional uma vez que o fluido estará sendo submetido a elevadas variações de pressão e de temperatura durante a sua circulação da superfície até o fundo do poço. A temperatura pode variar, por exemplo, entre a ambiente (na superfície) e 60°C (no fundo do poço), passando por 4°C no fundo do mar. Ainda existem poços cujas temperaturas são anormalmente altas e podem alcançar valores acima de 150°C, e as pressões alcançadas no fundo do poço são da ordem de 10.000 psi. As propriedades e características desejadas do fluido devem ser mantidas dentro de limites específicos que não comprometam o processo de perfuração em quaisquer situações de pressão e temperatura (Monteiro, 2004).

Diversos estudos foram realizados sobre os efeitos de diferentes temperaturas e pressões na reologia de fluidos de perfuração. Publicações sobre fluidos de perfuração à base de óleo e fluidos de perfuração sintéticos propuseram diferentes modelos reológicos para essas lamas, comparando-as com dados experimentais. A variação de viscosidade do fluido de perfuração com a temperatura e pressão também foram comparadas com leis empíricas. Entretanto, com o desenvolvimento das operações offshore profundas e ultra profundas, o fluido experimentará temperaturas mais baixas do que em operações convencionais de perfuração. Estudos sobre a reologia de fluidos de perfuração nessas condições são recentes e poucos dados podem ser encontrados na literatura.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Fluidos de perfuração

2.1.1. Histórico

A água foi o principal componente do primeiro fluido de perfuração que foi utilizado no início do terceiro milênio (antes de Cristo) no Egito, onde poços de 20 pés de profundidade foram perfurados com brocas rotatórias controladas manualmente, sendo a água utilizada para a remoção de cascalho nesses poços. De acordo com Confúcio, poços foram perfurados na China utilizando salmoura como fluido durante o início da dinastia Chou (1122–250 antes de Cristo). Muitos poços de algumas centenas de pés de profundidade foram perfurados perto da fronteira do Tibet utilizando salmoura, gás e água como fluido de perfuração. A água foi usada na perfuração desses poços para ajudar a amolecer as rochas e auxiliar na remoção dos cascalhos (Barros, 2007).

Na Europa, a partir da metade do século XIX, começou-se a pensar no fluido de perfuração como um auxiliar para remover os cascalhos gerados, através de sua circulação dentro do poço. Beart, na Inglaterra, em 1844 e Fauvelle, na França, em 1846, independentemente, apresentaram um método de perfuração por meio de hastes que giravam dentro da cavidade, ao mesmo tempo em que água era bombeada através dessas hastes para carrear os cascalhos gerados para a superfície. Esse método foi consolidado em 1866 por Sweeney, com um equipamento de perfuração rotatória, denominada “*stone drill*” (Barros, 2007).

Nesse mesmo período, iniciou-se a adição de materiais que conferiam à água propriedade de plasticidade (como argila, farelo de milho e cimento) para atribuir ao fluido uma nova função, a de revestir as paredes do poço para estabilizá-lo e reduzir a tendência ao desmoronamento. O desenvolvimento dessa nova função implicou diretamente no controle da pressão, principalmente em poços contendo gás, desenvolvendo-se um tipo de fluido que selava mais efetivamente as formações perfuradas em decorrência do aumento de sua densidade, inicialmente com o acréscimo de óxidos metálicos de ferro e a partir de 1922 com a popularização do uso de barita (Barros, 2007).

A partir daí, acentuou-se a pesquisa para o aprimoramento do desempenho dos materiais a serem adicionados ao fluido, com o desenvolvimento de outros sistemas para

aumentar a densidade, agentes para tornar a lama mais “fina”, para modificar a sua viscosidade e sistemas contendo sal e argilas para modificar as características do reboco formado para o controle da filtração (Barros, 2007).

As características dos materiais contidos nos fluidos de perfuração foram sendo aperfeiçoadas para se adequar às situações cada vez mais específicas. Rapidamente se percebeu a intrínseca relação entre água e folhelho, sendo este frequentemente encontrado durante as perfurações (Souza, 2007).

Os folhelhos são rochas sedimentares compostas majoritariamente por argilas laminadas ou estratificadas naturalmente, com granulação fina, aspecto terroso, pequenos poros e baixa permeabilidade, de modo que a perfuração de tais rochas pode resultar em problemas severos, tais como alargamento do poço, pressão diferencial ou perda de circulação, podendo-se, inclusive, chegar ao colapso total do poço (Souza, 2007).

Na tentativa de se minimizar as interações entre o folhelho e a água, foram desenvolvidos fluidos apropriados para prevenir o inchamento e desintegração durante a perfuração de folhelhos, fluidos com alto pH devido à elevada concentração de óxido de cálcio, fluidos contendo polímeros para impedir a dispersão dos cascalhos gerados durante a perfuração de folhelhos, e também auxiliar a limpeza do poço (Barros, 2007).

Grande parte do desenvolvimento dos fluidos de perfuração à base de água foi impulsionada principalmente para satisfazer condições de estabilidade e pressão do poço e de remoção de cascalho. Entretanto, a complexidade das condições de perfuração favoreceu o desenvolvimento dos fluidos à base de óleo. Com isso, nas décadas de 70 e 80, usavam-se, predominantemente, os fluidos à base de óleo, já que eles eram capazes de promover a estabilização de poços, além de proporcionar boa lubricidade, resistência à temperatura e redução de danos à formação. Esses fluidos, devido à alta concentração salina em sua fase aquosa, são capazes de prevenir o transporte osmótico de água para dentro do folhelho, capeando a parede do poço com uma fina camada de óleo, a qual atua como uma membrana semipermeável (Souza, 2007).

A década de 1990 viu o ressurgimento do interesse em novos produtos e sistemas de fluidos de perfuração. Grande parte do ressurgimento foi devido ao maior rigor das legislações ambientais dirigidas à restrição de materiais tóxicos e não-biodegradáveis.

Outra importante força motriz é o grande número de poços horizontais e de maior alcance sendo perfurados (Caenn, 1995).

2.1.2. Características e funções dos fluidos de perfuração

O sucesso da perfuração de poços de petróleo, bem como o seu custo, depende, em grande parte, das propriedades do fluido de perfuração, principalmente quando se trata de poços muito profundos (Barros, 2007).

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos e, por vezes, até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. Esses fluidos devem ser especificados de forma a garantir uma perfuração eficaz e segura. Portanto, é desejável que o fluido apresente as seguintes características:

- ser quimicamente estável;
- estabilizar mecanicamente as paredes do poço;
- facilitar a separação dos cascalhos na superfície;
- ser inerte em relação a danos às rochas produtoras;
- apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- facilitar as interpretações geológicas do material retirado do poço, e
- apresentar custo compatível com a operação.

Além disso, os fluidos de perfuração apresentam como principais funções carrear os cascalhos gerados pela broca até a superfície, exercer pressão hidrostática sobre as formações, de modo a evitar o influxo de fluidos indesejáveis e estabilizar as paredes do poço, bem como, resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca (Thomas *et al.*, 2001).

A Figura 1 apresenta as principais funções dos fluidos de perfuração e mostra, esquematicamente, o bombeio de fluido pelo interior da broca e seu retorno à superfície pelo espaço anular.

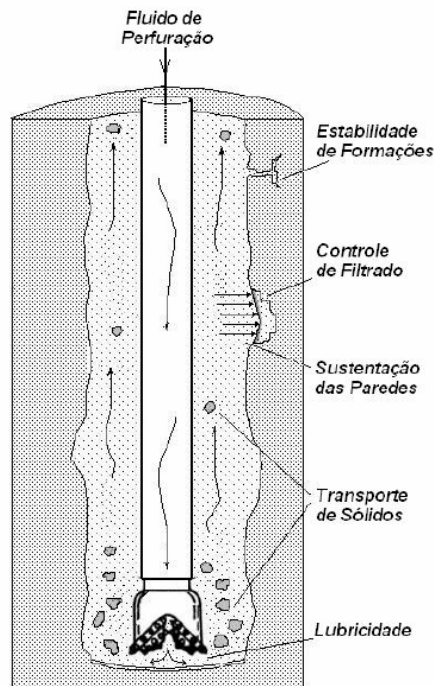


Figura 1: Diagrama esquemático das principais funções dos fluidos de perfuração (Souza, 2007).

Um fluido com elevada viscosidade é capaz de carrear os cascalhos para a superfície e também manter sólidos em suspensão. Entretanto, se a viscosidade for muito alta, o atrito dificulta a circulação da lama, podendo causar sobrecarga na bomba, diminuição da taxa de penetração e danos nos equipamentos de remoção de sólidos. Por conseguinte, as propriedades reológicas devem ser constantemente monitoradas durante toda a perfuração (Souza, 2007).

A densidade deve ser ajustada de modo a garantir suficiente pressão hidrostática para prevenir o desmoronamento do poço e impedir a saída de fluidos, em razão da porosidade das formações geológicas. Densidade muito elevada acarreta menor taxa de penetração, podendo também causar fraturamento das paredes do poço. O mais comum agente de carga usado para modificar a densidade é o sulfato de bário (barita). O conteúdo de sólidos em um fluido de perfuração é classificado consoante seu peso específico, sendo, por conseguinte, constituído por: materiais de alta densidade (barita) e de baixa densidade (argilas, polímeros e outros materiais). A quantidade e tipo de sólido presente em uma lama

de perfuração afetam várias propriedades do fluido, sendo necessário, portanto, seu estrito controle (Souza, 2007).

O resultado da invasão da fase líquida do fluido de perfuração em uma formação permeável é o depósito de um fino filme de sólido na superfície da formação, chamado de torta de filtração ou reboco. O controle da propriedade de perda de fluido permite restringir a invasão das formações pelo filtrado e minimizar a espessura do filme de lama formado nas paredes do poço, diminuindo as chances de haver danos às formações (Souza, 2007).

A reatividade química frente à matriz rochosa das paredes do poço está diretamente relacionada à composição do fluido de perfuração. As propriedades químicas do fluido são importantes para a sua operacionalidade, pois delas dependem seu bom desempenho no âmbito de suas várias funções como, por exemplo, a lubricidade e a estabilização de formações reativas (Souza, 2007).

2.1.3. Classificação dos fluidos de perfuração

A classificação de um fluido de perfuração é feita em função de sua composição, em que o principal critério se baseia no constituinte principal da fase contínua. Logo, quando o componente principal da fase contínua é um líquido, o termo lama é muito usado para a mistura formada pelos sólidos suspensos no líquido (Thomas *et al.*, 2001). Assim, os fluidos são classificados como fluidos à base de água (*water based mud - WBM*) e à base de óleo (*oil based mud - OBM*), sendo que em menor escala fluidos à base de ar ou gás são também utilizados. A presença de ambos os líquidos (óleo e água) juntos resulta em uma emulsão, formada através de agitação e da presença de um emulsificante adequado. A natureza química do agente emulsificante determina se o óleo está emulsificado na água (fluido de emulsão de óleo - *oil emulsion mud*) ou se a água está emulsificada no óleo (emulsão invertida - *inverted emulsion*) (Barros, 2007).

A natureza das fases contínua e dispersa, bem como os componentes básicos e suas quantidades, define não apenas o tipo de fluido, mas também as suas características e propriedades (Thomas *et al.*, 2001).

i. Fluidos à base de água – tem a água como fase contínua em que a proporção entre os componentes básicos e as interações entre eles provocam sensíveis modificações nas propriedades físicas e químicas do fluido. A principal função da água é prover o meio de dispersão para os materiais coloidais. Estes, principalmente argilas e polímeros, controlam a viscosidade e os limites de escoamento em valores adequados para conferir ao fluido uma boa taxa de remoção dos sólidos perfurados e capacidade de estabilização das paredes do poço. Polímeros orgânicos são comumente utilizados no controle da reologia dos fluidos de perfuração à base d'água. Esses fluidos são considerados, dependendo dos aditivos adicionados, ecologicamente corretos;

ii. Fluidos à base de óleo – os fluidos de perfuração são à base de óleo quando a fase contínua é constituída por óleo. Essa fase é, geralmente, composta de hidrocarbonetos líquidos, e gotículas de água formam uma fase emulsionada. Segundo Ferreira *et al.* (2008), os fluidos de perfuração à base de óleo foram desenvolvidos para perfurações em que os fluidos à base de água apresentam limitações técnicas e operacionais. Essas limitações podem ocorrer em perfurações de formações constituídas de rochas ativas, bem como em perfurações sob condições de altas temperaturas e pressões, em poços profundos e direcionais muito frequentes em exploração offshore. Esses fluidos são empregados em menor frequência devido ao seu alto custo inicial e à possibilidade de poluição que podem, eventualmente, provocar;

iii. Fluidos à base de ar – algumas situações recomendam a utilização desses fluidos de baixa densidade, tais como em zonas de perdas severas de circulação, em formações muito duras, em regiões com escassez de água e ainda em regiões glaciais com camadas espessas de gelo (Thomas *et al.*, 2001).

Conforme já citado, existem três tipos de fluidos, classificados conforme o tipo de fluido base usado em sua formulação. São eles: fluidos à base de água, de óleo e de ar. Atualmente, há uma nova geração de lama de perfuração em que o fluido base é constituído por moléculas orgânicas sintéticas, como por exemplo: ésteres, éteres, poliolefinas, glicóis e glicosídeos. Do ponto de vista do desempenho, podem ser considerados como similares

aos apresentados pelos fluidos à base de óleo, além de terem a vantagem de causar um menor impacto ambiental, uma vez que são menos tóxicos e mais biodegradáveis (Barros, 2007).

2.2. Gelificação de fluidos de perfuração

Monteiro *et al* (2004) e Gandelman *et al* (2006) dizem que a gelificação começa a ocorrer quando o fluido está em repouso e é uma propriedade fundamental em fluidos de perfuração, pois evita que sólidos que vinham sendo transportados sedimentem quando a bomba é desligada. A tendência à gelificação é maior em baixas temperaturas, típicas de águas profundas (cada vez mais comuns no cenário *offshore* brasileiro). Entretanto, após a formação da estrutura gelificada, a energia requerida para quebrá-la e recomeçar o escoamento do fluido será maior e, conseqüentemente, um pico de pressão será gerado. Desta forma, o fluido gelificado induz picos de pressão quando a bomba é religada, podendo atingir a pressão de fratura da formação, o que traz riscos à operação.

Marinescu (2008) diz que a gelificação é causada pela floculação da argila ou bentonita no fluido, e observada mesmo em altas temperaturas e pressões, mas eliminada a partir da temperatura de 200°C e pressão de 500 psi.

Oliveira *et al* (2008) cita que o fenômeno de gelificação é desejável, pois o fluido gelificado impede a precipitação dos cascalhos formados pela perfuração, evitando que esse material se acumule em cima da broca, situação essa que pode provocar avarias no equipamento. No trabalho foi simulado o reinício do escoamento de um fluido gelificado em um tubo, e que para o escoamento de um fluido com propriedades próximas às de um fluido de perfuração foi verificado que a magnitude da pressão quase no final do tubo chegou a atingir uma intensidade mais de 10 vezes superior à pressão obtida em regime permanente.

Annis (1967) menciona que quando o fluido está em repouso, o processo de gelificação depende do tempo e da temperatura. Em seus experimentos ele obteve que a força gel, num tempo de 30 minutos, era aproximadamente seis vezes a força gel inicial.

Também foi mostrado nos seus testes que a força gel aumentava indefinidamente com o tempo.

3. Comportamento reológico dos fluidos

3.1. Conceitos básicos

3.1.1. Reologia

A reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação de fluidos. Ela é um ramo da física relacionada com a mecânica dos corpos deformáveis. De outra forma, a reologia pode ser abordada como a ciência que estuda como a matéria se deforma ou escoou quando está submetida a esforços originados por forças externas (Machado, 2002).

A reologia tem importância para o entendimento da relação estrutura/propriedade dos materiais, tendo em vista que a variação das propriedades reológicas está intimamente relacionada às mudanças na estrutura, caso sejam mantidas as condições de teste. Já na indústria, o conhecimento do comportamento reológico de matérias-primas e produtos é importante para o projeto de equipamentos e controle dos processos. O acompanhamento das propriedades reológicas também serve como ferramenta de controle de qualidade e para o desenvolvimento de novos produtos (Nascimento, 2008).

Embora a teoria da reologia, qualitativa ou quantitativa, trate o fenômeno da deformação como reversível, a irreversibilidade está muitas vezes presente. As propriedades reológicas de uma substância, por vezes, mostram-se dependentes do tempo ou variam com a continuidade da deformação. Essas variações ocorrem sejam o fenômeno reversível ou irreversível (Machado, 2002).

3.1.2. Tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento

Grande parte dos estudos reológicos é realizada através da aplicação ou medição da tensão de cisalhamento (τ), que é definida como a componente de tensão que atua na direção paralela a uma dada face do elemento de fluido. A deformação por cisalhamento

($\dot{\gamma}$) possui a mesma direção de τ e ocorre, por exemplo, quando o fluido está entre duas placas paralelas e uma delas se movimenta em relação à outra (Nascimento, 2008).

A Figura 2 mostra um fluido localizado entre duas placas planas separadas por uma distância y . Uma força é aplicada na placa superior, resultando na sua movimentação desta a uma velocidade constante em relação à placa inferior, fixa. Supondo que não haja deslizamento do fluido nas paredes das placas, a força aplicada pela placa no fluido será equilibrada por uma força cisalhante produzida pela viscosidade do fluido. Essa força cisalhante pela área da placa é a chamada tensão de cisalhamento (Equação 1). A tensão de cisalhamento produz um escoamento viscoso, uma deformação no fluido e um gradiente de velocidade, que é equivalente à taxa de deformação por cisalhamento, também denominada taxa de cisalhamento (Equação 2) (Machado, 2002).

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Em que F é a força aplicada na direção do escoamento e S é a área da superfície exposta ao cisalhamento. A dimensão física da tensão de cisalhamento é, portanto, $M.L^{-1}.T^{-2}$. Suas unidades usuais são o N/m^2 ou Pascal (Pa), $dina/cm^2$ e lbf/ft^2 , nos sistemas internacional (SI), CGS e inglês, respectivamente.

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (2)$$

sendo Δv a diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes e Δy a distância entre elas. A dimensão da taxa de cisalhamento é T^{-1} e sua unidade mais comum é s^{-1} .

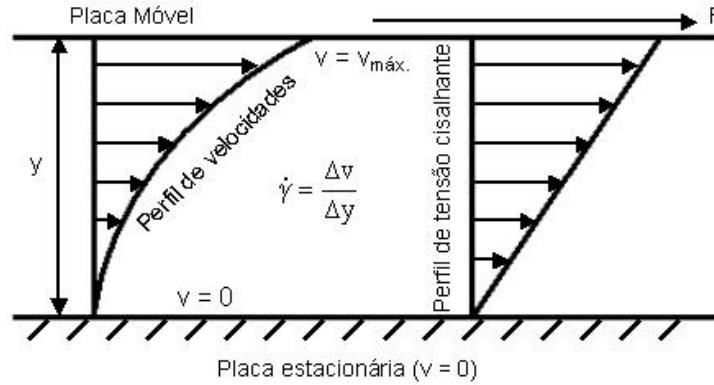


Figura 2: Fluido viscoso entre placas, cisalhado por uma força aplicada na placa superior (Machado, 2002).

3.1.3. Viscosidade

A massa específica e o peso específico são propriedades que indicam o “peso” de um fluido. Essas propriedades não são suficientes para caracterizar o comportamento dos fluidos porque dois fluidos (como água e óleo) podem apresentar massas específicas aproximadamente iguais, mas se comportar muito distintamente quando escoam. Assim, torna-se necessária alguma propriedade adicional para descrever a fluidez das substâncias (Munson, 2004).

Logo, viscosidade é a propriedade física de um fluido que exprime sua resistência ao cisalhamento interno, isto é, a qualquer força que tenda produzir o escoamento entre suas camadas (www.shs.eesc.usp.br).

Para os fluidos viscosos ideais, a tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de deformação por cisalhamento, em que a constante de proporcionalidade (μ) é, por definição, a viscosidade dinâmica do fluido, conforme explicita a expressão a seguir (Machado, 2002):

$$\tau = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (3)$$

De acordo com a equação 3, μ é uma viscosidade média em Δy e a curva de v como função de y nem sempre será uma linha reta. A equação 3 fica mais completa usando a definição de derivada, sendo $\dot{\gamma}$, por definição, a taxa de cisalhamento, definida por $\delta v/\delta y$.

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

Da equação 4, a viscosidade dinâmica de um fluido pode ser definida como a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa cisalhante.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

A partir da equação 5 resulta que a dimensão física da viscosidade dinâmica é $M.L^{-1}.T^{-1}$. Assim, as unidades decorrentes dessa equação são $Kg/(m.s)$ ou $Pa.s$, $g/(cm.s)$ ou $dina.s/cm^2$ (poise) e $lbf.s/ft^2$, nos sistemas SI, CGS e inglês, respectivamente. Entretanto, a unidade de viscosidade mais empregada no sistema internacional de unidades (SI) é o milipascal.segundo (ou $mPa.s$), cuja relação com o centipoise (cP) é unitária, ou seja, $1 mPa.s$ é igual a $1 cP$ (Machado, 2002).

A viscosidade dinâmica de fluidos à base de óleo varia com a pressão, mas a viscosidade dos fluidos em geral varia pouco com a pressão e esse normalmente é desprezado. Entretanto, o valor da viscosidade dinâmica é muito sensível às variações de temperatura. Por exemplo, quando a temperatura da água varia de $15^{\circ}C$ a $38^{\circ}C$, a massa específica diminui menos do que 1%, mas a viscosidade decresce aproximadamente 40%. Por esse motivo, é importante determinar a viscosidade do fluido na temperatura correta de aplicação (Munson, 2004).

Como a viscosidade é uma propriedade do fluido, da equação 5, pode-se inferir que para aumentar o grau de deformação de um certo fluido é necessário aumentar a força aplicada. Ao se comparar dois fluidos diferentes, cisalhados com a mesma força, sob as mesmas condições, verifica-se que aquele com viscosidade mais elevada apresentará menor grau de deformação. Na tabela 1 são mostrados os valores de viscosidade para algumas substâncias e materiais.

Tabela 1: Valores típicos ou ordem de grandeza da viscosidade em mPa.s ou cP, de substâncias e materiais a 20°C e 1 atm (Machado, 2002)

Substância ou material	Viscosidade	Substância ou material	Viscosidade
Ar	10^{-3}	Creme de leite, sangue	10^1
Etano, neon	10^{-2}	Lubrificantes	10^2
Éter	10^{-1}	Glicerina	10^3
Água	1,0	Mel	10^4
Mercúrio	1,5	Asfaltos e betumens	10^5-10^8

Outra grandeza útil, mostrada na equação 6, é a viscosidade do fluido dividida pela sua massa específica (ρ), conhecida por viscosidade cinemática (ν). A sua dimensão física é $L^2.T^{-1}$, e, por conseguinte a sua unidade no sistema CGS é o cm^2/s , conhecida por Stoke (St). No sistema SI a sua unidade é o m^2/s , contudo a unidade mais empregada é o centistokes ($1 \text{ cSt} = 0,01 \text{ St} = 1 \text{ mm}^2/s$).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

3.1.4. Curvas de viscosidade e de tensão cisalhante

A correlação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento que define o comportamento do escoamento de um fluido é mostrada graficamente em um diagrama de τ na ordenada e de $\dot{\gamma}$ na abscissa. Esse diagrama é chamado de reograma (Schramm, 2006).

O reograma mais simples é mostrado na Figura 3, em que a viscosidade da equação 5 é assumida como constante e independente de $\dot{\gamma}$.

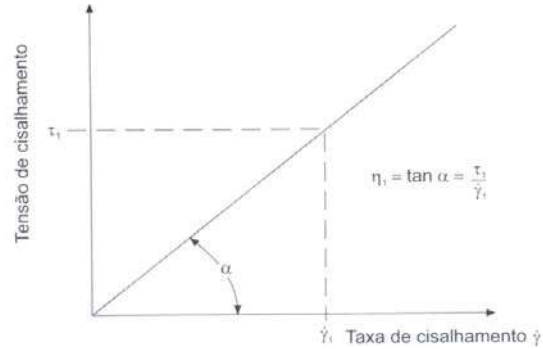


Figura 3: Reograma (Schramm,2006).

Outro diagrama muito comum é: η versus $\dot{\gamma}$. Esse diagrama é chamado de “curva de viscosidade”.

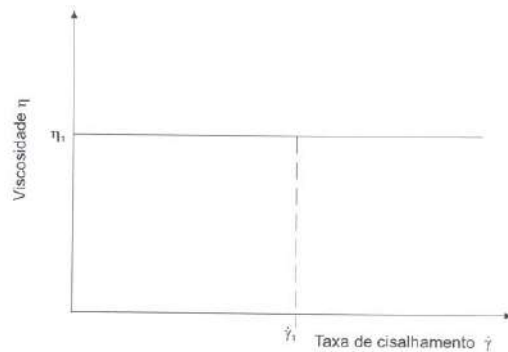


Figura 4: Curva de viscosidade (Schramm,2006).

A curva de viscosidade mostrada na Figura 4 corresponde ao reograma da Figura 3.

3.1.5. Fluidos Newtonianos

Os fluidos podem ser classificados, de modo geral, de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento são chamados Newtonianos (Barros, 2007). Portanto, a Lei de Newton da viscosidade é dada, para o escoamento unidimensional (em que, segundo Fox (2001), uma coordenada espacial é suficiente para se especificar o campo de velocidade), por:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (7)$$

Logo, considera-se como sendo um fluido Newtoniano aquele cuja viscosidade só é influenciada pela temperatura e pressão. Uma única determinação experimental é suficiente para definir o único parâmetro reológico do fluido Newtoniano. A sua viscosidade é única e absoluta, pois a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento é constante, como se pode verificar na Figura 5. Água, ar, óleos finos e glicerina são exemplos de materiais com comportamento newtoniano, e vale ressaltar que para gases, a viscosidade aumenta com a temperatura, enquanto para líquido a viscosidade diminui com o aumento da temperatura (Fox, 2001).

3.1.6. Fluidos Não-Newtonianos

A Lei de Newton para viscosidade representou um grande passo para a compreensão do comportamento dos fluidos sob escoamento obtido por cisalhamento. Esse modelo idealizado impõe que a viscosidade é uma propriedade física imutável, variando apenas mediante a variação de temperatura e pressão. Portanto, sem grande utilidade para uma significativa parcela de fluidos, cujas viscosidades deixam de ser um coeficiente para se tornar uma propriedade que varia de acordo com as condições com as quais o fluido se depara (Egawa, 2007).

Os fluidos não-Newtonianos são todos os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, ou seja, a viscosidade varia também com a taxa de cisalhamento, conforme pode ser visto na Figura 5. Os fluidos não-Newtonianos podem considerar ou não o efeito do tempo sobre a relação tensão de cisalhamento X taxa de cisalhamento (Barros, 2007).

Fox (2001) mostra que as relações entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento para fluidos não newtonianos com comportamento independente do tempo podem ser adequadamente representadas, para muitas aplicações da engenharia, pelo modelo exponencial, que para o escoamento unidimensional resulta na Equação 8.

$$\tau_{yx} = k \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n = k \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (8)$$

Na Equação 8, o expoente n é chamado de índice de comportamento do escoamento e o coeficiente k o índice de consistência. Essa equação se reduz à Lei de Newton para a viscosidade (Eq. 8) para $n = 1$ e $k = \mu$. O termo $\eta = k|du/dy|^{n-1}$ é referenciado como viscosidade aparente. A maioria dos fluidos não newtonianos tem viscosidade aparente relativamente elevada em comparação com a viscosidade da água.

O comportamento observado para cada tipo de fluido pode, muitas vezes, indicar mudanças estruturais ocasionadas pelo cisalhamento. Algumas definições e possíveis explicações para os comportamentos estão relacionadas a seguir:

i. Fluido pseudoplástico – A maioria dos fluidos não-newtonianos se enquadra nesse grupo, onde observa-se a diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento ($n < 1$). Isso ocorre como conseqüência do estiramento de macromoléculas (no caso de polímeros fundidos ou em solução), da deformação de gotículas (no caso de emulsões) ou, no caso de suspensões e dispersões, devido à orientação das partículas ou à destruição de agregados.

ii. Fluido dilatante – O comportamento dilatante consiste no aumento da viscosidade com a taxa de cisalhamento ($n > 1$) e é raramente encontrado. Esse caso pode ocorrer em misturas de partículas em contato íntimo com uma quantidade de líquido suficiente somente para preencher os espaços entre as partículas. Em baixas velocidades de escoamento, a fricção interna na mistura é pequena, com o líquido agindo como lubrificante entre as partículas em movimento. Em velocidades mais elevadas, as partículas se separam e o líquido vai preenchendo o espaço entre elas, aumentando, dessa maneira, a fricção interna, isto é, a viscosidade. A mistura de água e areia é um exemplo de fluido dilatante.

iii. Fluido com tensão limite de escoamento – É necessário que haja a aplicação de uma tensão inicial (τ_0) para que o material efetivamente escoe. Essa tensão indica a

ocorrência de fortes interações entre os componentes do fluido. Também conhecido como Plástico de Bingham, um exemplo clássico deste tipo de fluido é o da pasta de dente (Nascimento, 2008). O modelo correspondente para a tensão de cisalhamento é:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (9)$$

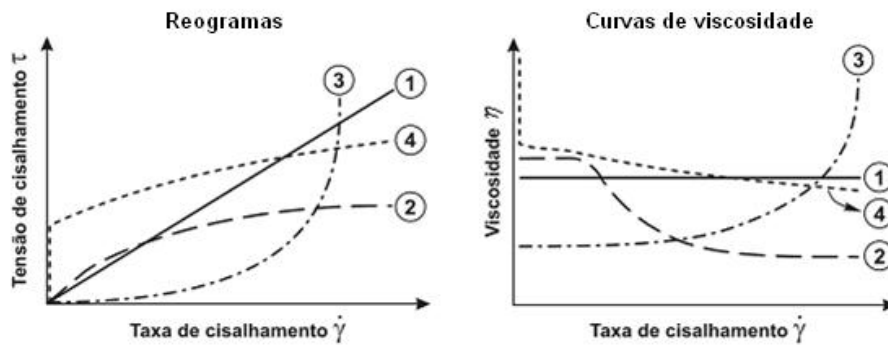


Figura 5: Comportamentos de escoamentos independentes do tempo: (1) newtoniano, (2) pseudoplástico, (3) dilatante e (4) plástico de Bingham (Schramm, 2006).

Na Figura 6 é mostrado que o comportamento cisalhante de alguns líquidos pode também mudar com o tempo. Para a situação em que a viscosidade aumenta com tempo, o líquido é chamado reopético; quando há diminuição, o líquido é chamado tixotrópico. A viscosidade de um líquido pode também depender da taxa de mudança de tensão de cisalhamento aplicada. Por exemplo, os líquidos viscoelásticos agem como um líquido newtoniano se o cisalhamento aplicado for constante, mas como um material elástico se a taxa de cisalhamento estiver mudando (Toscano, 2005), ou seja, após a deformação eles voltam à sua forma original quando a tensão aplicada é removida (Fox, 2001).

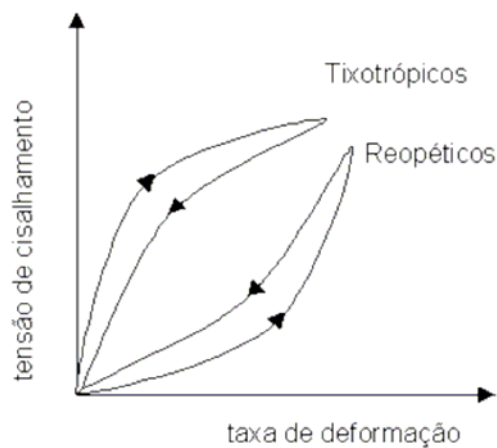


Figura 6: Curvas de escoamento de fluidos não newtonianos com propriedades dependentes do tempo de cisalhamento (Schramm, 2006).

Além disso, há uma classificação ainda não comentada. Trata-se do modelo de Herschel-Buckley, também denominado pseudoplástico com tensão residual ou Bingham generalizado. Esse tipo de fluido também necessita de uma tensão inicial para começar a escoar (Eq. 10). Entretanto, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é linear. Essa relação depende do expoente adimensional n , característico para cada fluido.

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \eta \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n \quad (10)$$

3.2. Propriedades reológicas

3.2.1. Viscosimetria e reometria

Viscosimetria é um segmento da mecânica dos fluidos que consiste na prática experimental de medir a resposta reológica dos fluidos, considerados puramente viscosos, em que a componente elástica possa ser desprezada (Machado, 2002).

Segundo Kiryu (2006), reometria pode ser definida como o estudo das técnicas que possibilitam a medição das propriedades reológicas de um fluido e o seu objetivo é

determinar as características do fluido a partir de medições feitas em escoamentos simples e controlados.

Logo, os equipamentos limitados apenas à medida dos parâmetros viscosos do fluido sob cisalhamento contínuo são denominados viscosímetros. Os reômetros são instrumentos que permitem investigar tanto o comportamento sob condição de escoamento pleno, quanto determinar as propriedades de sólidos, semi-sólidos e fluidos (Machado, 2002).

A medida dos parâmetros reológicos baseia-se na determinação da relação entre o torque necessário e a velocidade de rotação de um corpo que se encontra imerso ou em contato com o fluido. No caso do reômetro Searle, ilustrado na Figura 7, determina-se o torque necessário para manter constante a velocidade de rotação e no reômetro Couette, ilustrado na Figura 8, aplica-se um torque e mede-se a velocidade correspondente (Haminiuk, 2005). De outra forma, no reômetro Searle o torque é medido no eixo do rotor e o cilindro externo e as placas inferiores são estacionárias, e no reômetro Couette o cilindro externo ou as placas inferiores giram e o torque é percebido no cilindro interno que não gira ou no cone (Schramm, 2006).

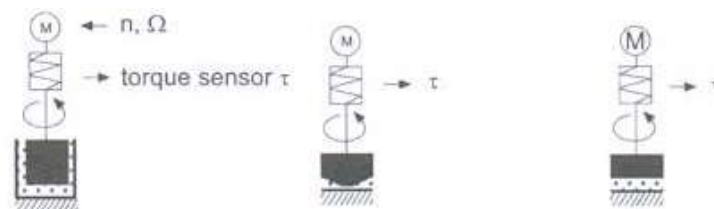


Figura 7: Esquema de funcionamento do reômetro rotacional tipo Searle (cilindro concêntrico, cone-placa e placa-placa) (Schramm, 2006).

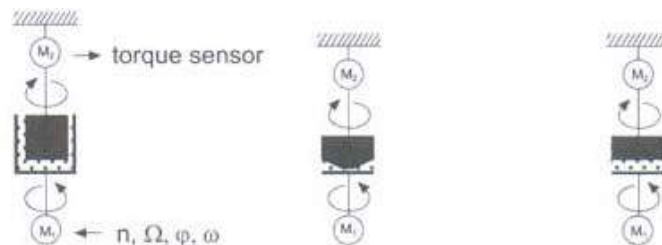


Figura 8: Esquema de funcionamento do reômetro rotacional tipo Couette (cilindro concêntrico, cone-placa e placa-placa) (Schramm, 2006).

O tipo de reômetro rotacional mais comum é do tipo Searle e pode apresentar várias configurações dependendo da geometria dos corpos rotacionais. Dessa forma, os projetos mais usuais dos reômetros rotacionais se baseiam em escoamentos permanentemente laminar, através de geometrias bem definidas (cilindros concêntricos, cone e placa e placas planas paralelas), amplamente estudados e conhecidos da mecânica dos fluidos (Schramm, 2006).

O reômetro rotacional de cilindros concêntricos é um instrumento que opera em uma faixa de taxa de cisalhamento moderada, fazendo deste uma boa escolha para coleta de dados utilizados em muitos cálculos de engenharia. Esses reômetros mantêm uma velocidade de rotação constante a certa taxa de cisalhamento, e a tensão de cisalhamento é obtida através da medida do torque no cilindro. São projetados para causar um cisalhamento no fluido localizado entre dois cilindros concêntricos, sendo que um gira e outro permanece estacionário permitindo-se obter curvas reológicas (Haminiuk, 2005).

3.2.2. Escolhendo o melhor sistema de medição

A escolha da geometria mais apropriada para materiais complexos é um ponto extremamente importante. Na prática, para qualquer fluido, é muito difícil encontrar a geometria que forneça uma taxa de deformação perfeitamente homogênea entre as placas (cones, cilindros, discos). Então, na maioria dos casos, têm-se uma taxa de deformação heterogênea e os dados reométricos convencionais nos mostram apenas as características médias do escoamento (torque, velocidade de rotação, pressão) nas bordas (Kiryu, 2006).

Haminiuk (2005) diz que devido à variedade de sistemas utilizados para obtenção dos parâmetros reológicos, sendo os mais comuns os cilindros coaxiais, cone-placa e placa-placa, é muito comum não saber qual sistema é o ideal para o material a ser analisado. Logo, antes de selecionar a melhor geometria é importante considerar o objetivo do experimento, a natureza da amostra e as condições sob as quais o experimento será realizado, mas algumas vezes nem todas as respostas para essas questões são conhecidas. Uma boa escolha é necessária para obter a melhor qualidade de dados possíveis e eliminar erros como deslizamento e evaporação de solvente (manual ARG2).

No entanto, além da escolha do sistema de medida apropriado é de fundamental importância a escolha da faixa correta da taxa de cisalhamento para a realização dos ensaios experimentais (Haminiuk, 2005).

3.2.2.1. Cilindros concêntricos

O sistema de medição cilindros concêntricos (ou copo e bob) geralmente é usado para amostras de baixa viscosidade que não ficam retidas no gap das geometrias cone e placa e placas paralelas, sendo também usadas em amostras que exibem separação de fases sob ação da gravidade (Manual ARG2).

Como mostrado na Figura 9, nesse sistema promove-se o escoamento da amostra entre dois cilindros concêntricos, de raios R_1 e R_2 respectivamente, sendo que um gira e outro permanece estacionário permitindo-se obter curvas reológicas. A distância anular entre os cilindros é de largura constante; assim, os testes ficam limitados apenas às amostras que contêm tamanho de partícula menor do que 1/3 do tamanho dessa distância (Schramm, 2006).

Os inconvenientes dos cilindros concêntricos são que eles necessitam de maiores volumes de amostra e a presença de efeitos de borda, mas permitem um bom controle de temperatura da amostra testada, devido ao trocador de calor que envolve completamente o cilindro externo (Schramm, 2006).

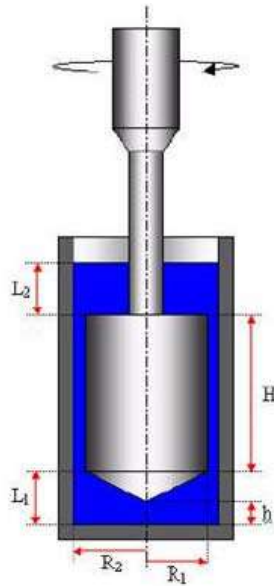


Figura 9: Geometria cilindros concêntricos com amostra corretamente carregada (Manual ARG2).

3.2.2.2. Cone-placa

Os sistemas de medição tipo cone-placa geralmente são escolhidos se a limpeza do equipamento após o teste é um problema. São constituídos de uma placa plana horizontal e um cone invertido, com a ponta cortada, cujo vértice encontra-se muito próximo da placa (Figura 10), e normalmente, os ângulos dos cones são muito pequenos ($\alpha = 0,0174$ rad, (1°)) (Haminiuk, 2005).

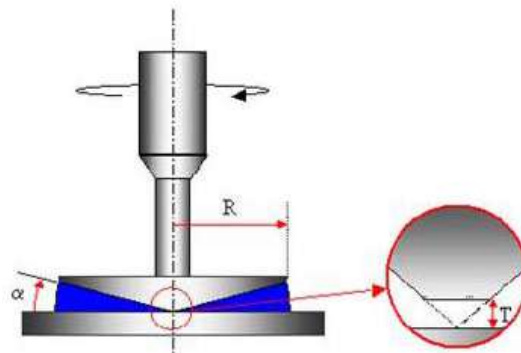


Figura 10: Geometria cone-placa com amostra corretamente carregada (Manual ARG2).

É frequentemente adotado porque a taxa de cisalhamento é uniforme através da amostra. Isso faz com que a geometria seja útil para medir as propriedades não-lineares das amostras, como a viscosidade de fluidos não-newtonianos. Além disso, um importante argumento para a escolha do cone-placa é que a quantidade de amostra usada é normalmente muito menor do que a quantidade de amostra requerida para a maioria dos sistemas cilíndricos. Isso tem importância em casos que a amostra é muito preciosa ou existem apenas algumas gotas disponíveis (Schramm, 2006).

A geometria cone e placa geralmente é usada para amostras homogêneas de médias a altas viscosidades, ou amostras com tamanhos de partículas da ordem de micra. Ela não é recomendada para amostras contendo grandes partículas, pois elas podem migrar para o vértice do cone, acarretando mudanças nas dimensões do pequeno espaçamento angular e influenciando negativamente nos resultados.

Entretanto a limitação mais séria desse sistema está relacionada às forças normais (resultantes da resposta elástica das amostras viscoelásticas quando submetidas ao cisalhamento), que são capazes de empurrar a amostra para fora do espaçamento angular e acima da borda do cone, provocando uma divisão da amostra no espaçamento angular e alterando os resultados (Schramm, 2006). Com isso, para fluidos muito viscosos, as taxas de cisalhamento máximas devem ser inferiores a 10 s^{-1} (Castro, 2001).

3.2.2.3. Placas paralelas

Esse sistema é constituído de duas placas paralelas em forma de disco, o qual pode ser visualizado na Figura 11.

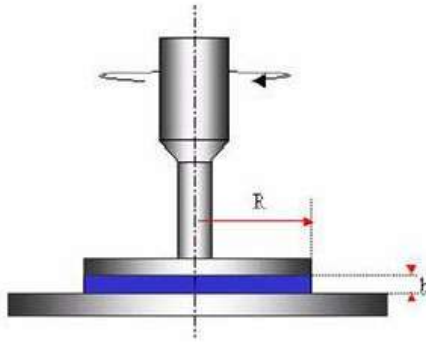


Figura 11: Geometria placas paralelas com amostra corretamente carregada (Manual ARG2).

O sistema placa-placa é determinado pelo raio R da placa e a distância h (*gap*) entre as placas, sendo que esta distância pode variar (diferentes taxas de cisalhamento), não podendo ser menor que 0,3 mm e maior que 3 mm para evitar erros relacionados à natureza da amostra. O sistema placa-placa é indicado para materiais não-homogêneos, e, portanto, pode ser usado para amostras contendo grandes partículas. A altura entre as placas deve ser pelo menos três vezes maior que o tamanho da maior partícula do material a ser medido reologicamente (Schramm, 2006).

O manual do reômetro ARG2 diz que não há um mínimo teórico do *gap* a ser usado, mas na prática qualquer ausência de paralelismo entre as placas resulta num erro de medida que aumenta à medida que o *gap* é reduzido. Por essa razão, o menor *gap* a ser usado é frequentemente 1% do diâmetro da geometria e o máximo *gap* dependerá das propriedades da amostra; se ele for muito grande pode haver gradiente de temperatura através da amostra. Uma boa regra prática é que o tamanho do *gap* deve ser pelo menos dez vezes maior que o maior tamanho da partícula.

A principal desvantagem das placas paralelas é que a taxa de cisalhamento varia ao longo da placa, de zero no centro da placa até o máximo na borda. A deformação e a taxa de cisalhamento informadas pelo programa são as da borda da placa (Manual ARG2).

Logo, pode-se concluir que o sistema de placas paralelas é uma alternativa ao uso de sistemas de medição tipo cone-placa. Para sistemas de medição com mesmo raio é necessário um maior volume de amostra do que nos sistemas de medição tipo cone-placa; porém esse volume é ainda muito menor do que o requerido para os testes com sistemas de

cilindros coaxiais. Além disso, como citado anteriormente, esses sistemas são usados para evitar os problemas com amostras que possuem uma grande quantidade de particulados.

3.2.3. Viscoelasticidade

Durante a segunda metade do século XIX, cientistas começaram a notar que certos materiais mostravam dependência com o tempo em suas respostas elásticas. Atualmente, conhecemos essa resposta como viscoelasticidade (Ochoa, 2006).

A palavra viscoelasticidade significa a existência simultânea de propriedades elásticas e viscosas num material. Todos os materiais são viscoelásticos, isto é, em todos os materiais, ambas as propriedades viscosa e elástica coexistem. A resposta particular de uma amostra em um dado experimento depende da escala de tempo do experimento em relação ao tempo natural do material. Então, se o experimento é relativamente lento, a amostra será mais viscosa do que elástica; entretanto, se o experimento é relativamente rápido a amostra será mais elástica do que viscosa. Numa escala de tempo intermediária, uma resposta misturada (viscoelástica) é observada (Ochoa, 2006).

Para a devida caracterização reológica das amostras é primordial a determinação da região viscoelástica linear das soluções a serem analisadas. A região viscoelástica linear é aquela em que a solução responde à força ou tensão aplicada de uma forma homogênea, isto é, os módulos de armazenamento (ou módulo elástico, G') e perda (ou módulo viscoso, G'') são constantes a uma dada faixa de deformação, ou em outras palavras, a tensão e a deformação estão relacionadas linearmente e o comportamento do fluido pode ser descrito como uma simples função do tempo. Esse ensaio é importante, pois define a região de deformação a ser adotada nos demais ensaios reológicos e é também possível determinar a deformação máxima que a amostra é capaz de suportar (Egawa, 2007). E, além disso, o limite da linearidade pode ser determinado quando as propriedades reológicas dinâmicas (G' e G'') em uma varredura de tensão ou deformação, passam a variar fortemente após um intervalo em que esses valores se mantêm praticamente constantes (Sato, 2005).

3.2.4. Testes oscilatórios ou dinâmicos

Em testes em regime permanente, uma deformação é aplicada à amostra e a tensão resultante é medida. Quando se realiza um teste oscilatório com um reômetro rotacional, o rotor não está mais girando continuamente em uma direção, mas sendo girado alternadamente, com uma função de tempo senoidal de pequeno ângulo θ , para a direita e para a esquerda. O ângulo de deflexão do rotor é quase sempre pequeno (não mais do que 1°). Sendo assim, amostras de fluidos viscoelásticos e mesmo de sólidos não serão mecanicamente perturbadas e nem suas estruturas internas serão rompidas durante um teste dinâmico (Correia, 2006).

Os ensaios oscilatórios são particularmente úteis para caracterizar a conformação macromolecular e interações intermoleculares em solução. Como citado anteriormente, em um experimento dinâmico ou periódico, uma tensão ou deformação oscilatória senoidal a uma frequência f é aplicada no material e a diferença de fase entre tensão e deformação oscilatórias, bem como a taxa de amplitude, são medidas (Sato, 2005). Nesses ensaios, o módulo de armazenamento (módulo de rigidez dinâmica ou módulo elástico), G' , que indica a parcela equivalente de energia proveniente da tensão aplicada, que é temporariamente armazenada durante o teste, mas que pode ser recuperada posteriormente, é definido por:

$$G' = G^* \cdot \cos \delta = \left(\frac{\tau_{\text{máx}}}{\dot{\gamma}_{\text{máx}}} \right) \cdot \cos \delta \quad (11)$$

O módulo de cisalhamento (módulo de perda ou módulo viscoso), G'' , que indica a parcela de energia que foi utilizada para iniciar o escoamento e transferida irreversivelmente para a forma de calor é definido por:

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta = \left(\frac{\tau_{\text{máx}}}{\dot{\gamma}_{\text{máx}}} \right) \cdot \sin \delta \quad (12)$$

Conforme mostra a equação 13, a razão entre G'' e G' é chamada de tangente do ângulo de fase δ , também conhecido como coeficiente de amortecimento, ou seja, é a razão entre a energia dissipada e a energia potencial armazenada por ciclo.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (13)$$

G^* é chamado de módulo complexo em cisalhamento, e relaciona a tensão com a deformação em regime oscilatório, podendo também ser definido de outra forma, por uma equação contendo uma parte real e outra imaginária que engloba as suas componentes viscosa e elástica (Equação 14). G^* mede a resistência do material à deformação, e quanto maior seu valor, mais resistente (elástica) é a estrutura.

$$G^* = \frac{\tau_{\text{máx}}}{\dot{\gamma}_{\text{máx}}} = G' + i \cdot G'' \quad (14)$$

Quando uma substância é puramente viscosa, seu ângulo de mudança de fase é 90° e, conseqüentemente seu módulo de armazenamento é zero ($G' = 0$), e o módulo complexo é igual ao módulo de perda, $G^* = G''$. Por outro lado, se a substância é puramente elástica, o ângulo de fase é zero, seu módulo de perda é zero ($G'' = 0$), conseqüentemente, o módulo complexo é igual ao módulo de armazenamento, $G^* = G'$ (Machado, 2002).

3.2.5. Propriedades reológicas dos fluidos de perfuração

Na indústria do petróleo, os conhecimentos básicos de reologia auxiliam na análise do comportamento reológico dos diversos tipos de fluidos empregados nas etapas de perfuração e produção de poços, e transporte e refino do petróleo. Entre outras aplicações, a definição dos parâmetros reológicos, por sua vez, permite que se estime as perdas de pressão por fricção também denominada as perdas de carga, a capacidade de transporte e sustentação de sólidos, além de especificar e qualificar fluidos, materiais viscosificantes, petróleo e derivados (Machado, 2002).

Um dos segmentos que mais tem exigido a compreensão das características e efeitos elásticos dos fluidos é o da perfuração de poços de alta inclinação e afastamento, técnica amplamente empregada na exploração em água profundas, áreas urbanas e de preservação ambiental. Vários fluidos de perfuração atuais têm incluído, na sua formulação, aditivos que lhes conferem caráter elástico, notadamente a baixas taxas de cisalhamento (Machado, 2002).

Os fluidos de perfuração mais utilizados nas operações de perfuração são não-newtonianos e possuem perfil pseudoplástico, onde o aumento da taxa de cisalhamento reduz a viscosidade aparente do fluido. Por isso, há uma grande preocupação com o controle das condições de operação para que não seja reduzida, durante o processo de perfuração, a capacidade de remoção dos cascalhos gerados pela broca (Carneiro, 2006).

4. Objetivo

O presente trabalho propõe avaliar a aplicação de diversos ensaios reológicos para representar a gelificação dos fluidos nas condições do fundo do mar (baixas temperaturas e altas pressões). Entretanto, devido a limitações de equipamento somente foi analisada a influência da temperatura.

Uma vez estabelecidos os procedimentos, avaliar a gelificação de sistema de fluido em diferentes tempos de parada (representando conexões, manobras curtas e completas). Com isso espera-se obter uma melhor compreensão desse fenômeno para desenvolver uma metodologia a ser usada em campo para impedir o aparecimento de picos de pressão excessivamente grandes na retomada da circulação, evitando assim riscos operacionais.

5. Materiais e métodos

5.1. Fluido de perfuração

O fluido de perfuração à base de óleo utilizado no presente trabalho foi preparado e fornecido pelo setor de fluidos de perfuração do CENPES (Petrobras). A sua formulação está descrita na Tabela 2.

Tabela 2: Formulação do fluido à base de óleo

Produto	Quantidade	Função
Base parafina	0,57 BBL	Fase Contínua
Ez Mul	9,0 lb/BBL	Emulsificante
Cal hidratada	2,5 lb/BBL	Controle de pH
Salmoura de NaCl	0,39 BBL	Fase aquosa
Ecotrol	1,0 lb/BBL	Controlador de filtrado
Argila organofílica	2,0 lb/BBL	Viscosificante
Barita	até 9,5 lb/Gal	Adensante
Nova Wet	2,0 lb/BBL	Emulsificante
Nova Mod	1,0 lb/BBL	Modificador reológico

Em que 1 BBL = 159L; 1 lb = 0,454 kg; 1 Galão (Gal) = 3,78 L.

5.2. Procedimento experimental

5.2.1. Determinação do intervalo de viscoelasticidade linear

Antes de realizar o procedimento experimental de 5 etapas do trabalho, foi realizada uma varredura de deformação a uma frequência constante (0,1 Hz) para cada temperatura a fim de obter um valor dentro do intervalo de viscoelasticidade linear, que foi usado na etapa 3, na qual foi simulado o repouso da amostra. Essa frequência deve ser suficiente baixa para que o tempo de resposta do material não destrua o gel formado.

Para realizar esse teste a amostra foi mantida sob agitação manual por aproximadamente 1 minuto. Após esse tempo, uma alíquota de aproximadamente 20 mL foi transferida para o reômetro, e em seguida, procedeu-se a análise.

5.2.2. Metodologia de 5 etapas

O comportamento reológico do fluido foi determinado por meio de ensaios em reômetro rotacional, modelo ARG2 da TA (Figura 12), utilizando a geometria cilindros concêntricos de base cônica, com raio externo de 15 mm e raio interno 14 mm, em diferentes temperaturas (4, 25, 40 e 60°C) e em pressão atmosférica. A metodologia empregada, também utilizada por Gandelman *et al* (2006), visou reproduzir as etapas de circulação, parada e retomada da circulação do fluido. Os ensaios contemplaram curvas de variação de viscosidade em função da taxa de cisalhamento aplicada e do tempo, bem como a variação dos módulos elástico e viscoso em função do tempo de repouso na frequência de 0,1 Hz.



Figura 12: Reômetro ARG2.

O procedimento dos testes realizados no reômetro rotacional, cujo fluxograma é mostrado na Figura 13, consistiu de cinco etapas descritas a seguir. Lembrando que, antes de transferir a alíquota para o reômetro, a amostra foi mantida sob agitação manual por aproximadamente 1 minuto.

1) Inicialmente, o fluido foi submetido a uma rampa de taxa de cisalhamento de 0,1 a 1000 s^{-1} . Essa etapa teve como objetivo a determinação dos parâmetros reológicos do fluido antes da gelificação. E, além disso, visou fornecer a caracterização reológica do fluido nas várias etapas do sistema de circulação.

2) Após a primeira etapa, o fluido foi submetido a uma taxa de cisalhamento de 10 s^{-1} , valor representativo do escoamento no riser, durante 10 minutos.

3) Em seguida, a amostra foi submetida a uma oscilação na frequência de 0,1 Hz por 10 minutos, a uma deformação constante, cujo valor foi obtido no teste de viscoelasticidade linear. Essa etapa simula o repouso do fluido antes da retomada do bombeamento, e o objetivo foi a monitoração do módulo elástico (G') e do módulo viscoso (G''), minimizando a interferência no fluido. Com isso, pretendeu-se acompanhar a progressão da gelificação em condições dinâmicas que não destruam a estrutura em formação.

4) Após isso, aplicou-se novamente uma taxa de cisalhamento constante de 10 s^{-1} durante 10 minutos. O objetivo dessa etapa foi simular as condições de retomada de circulação no riser após períodos de repouso. Espera-se observar um pico inicial na viscosidade, indicando a quebra do gel.

5) Por fim, o fluido foi novamente submetido a uma rampa de taxa de cisalhamento idêntica à da primeira etapa. Essa última etapa teve como objetivo a comparação da reologia do fluido antes e após a gelificação. Não é esperada, em princípio, nenhuma diferença entre as curvas antes e depois da parada.

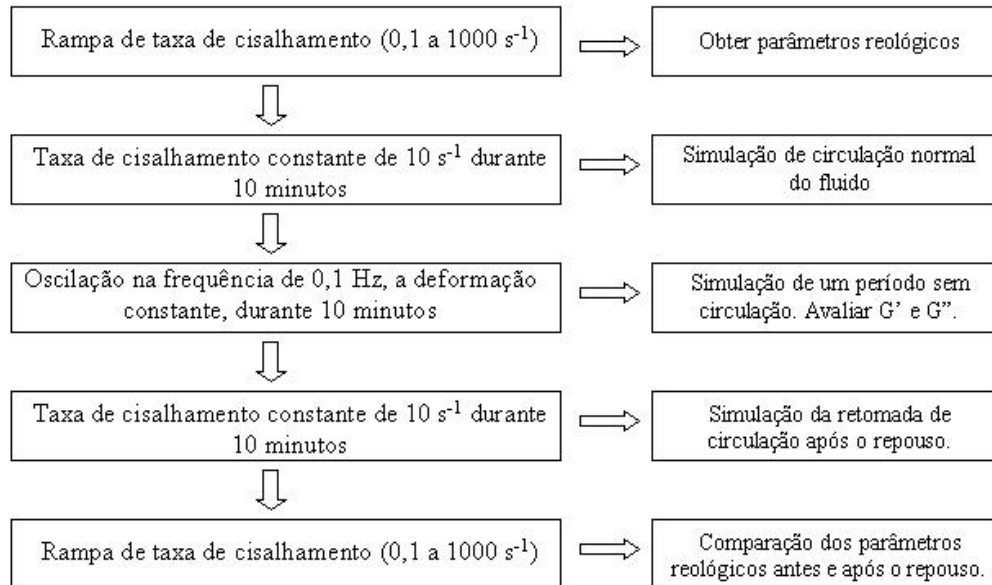


Figura 13: Fluxograma com a metodologia aplicada.

Para analisar o efeito do tempo de repouso foi utilizado o procedimento acima, à temperatura de 40°C, variando apenas o tempo simulado na etapa 3. Devido à limitação de disponibilidade de equipamento não foram escolhidos tempos longos para essa análise e, com isso, os tempos simulados foram: 1, 5, 10, 30 e 60 minutos. Contudo, suficiente para representar conexões e alguns tipos de manobras durante o processo de perfuração, e que necessitam de uma interrupção do escoamento do fluido, mas na prática podem ocorrer situações que exijam uma interrupção por um período superior a 24 horas.

Vale ressaltar que esses experimentos foram realizados em quadruplicatas e que os resultados apresentados nos gráficos são as médias dos valores obtidos.

5.2.3 Homogeneização da amostra

Para avaliar a influência da homogeneização da amostra, foi adotado o seguinte procedimento:

- 1) Agitou-se manualmente a amostra contida dentro de um frasco por 1 minuto.
- 2) Foram transferidos aproximadamente 125 mL de amostra para um bequer de 150mL.

- 3) Com um agitador Turrax, a amostra foi homogeneizada a uma velocidade de 12000 rpm, durante 15 minutos.
- 4) Ao término da agitação, transferiu-se um volume de 19,6 mL da amostra para o reômetro com o objetivo de proceder as análises.

5.3. Análise estatística

Os dados obtidos foram avaliados estatisticamente pela análise de variância (ANOVA), usando o programa STATISTICA 7.0, cujo objetivo é saber se diferentes níveis das variáveis independentes afetam a variável dependente. Ou seja, a análise de variância no presente trabalho procurou avaliar a influência da temperatura e do tempo de repouso na viscosidade da amostra, considerando um nível de significância de 5%.

6. Resultados e discussão

Para explicar a influência da temperatura e do tempo de repouso na viscosidade aparente do fluido de perfuração analisado, os resultados serão apresentados em dois subitens (6.1 e 6.2). Entretanto, antes de iniciar o procedimento experimental do trabalho, foi realizada uma varredura de deformação a uma frequência constante (0,1 Hz) cujos resultados são mostrados na Figura 14.

A Figura 14 mostra as curvas de G' e G'' em função da deformação nas 4 temperaturas utilizadas no trabalho. Independente da temperatura de trabalho os resultados mostraram uma região viscoelástica linear definida em até 0,2% da deformação. A partir disso, foi adotado o valor de 0,08% para a deformação requerida na etapa 3.

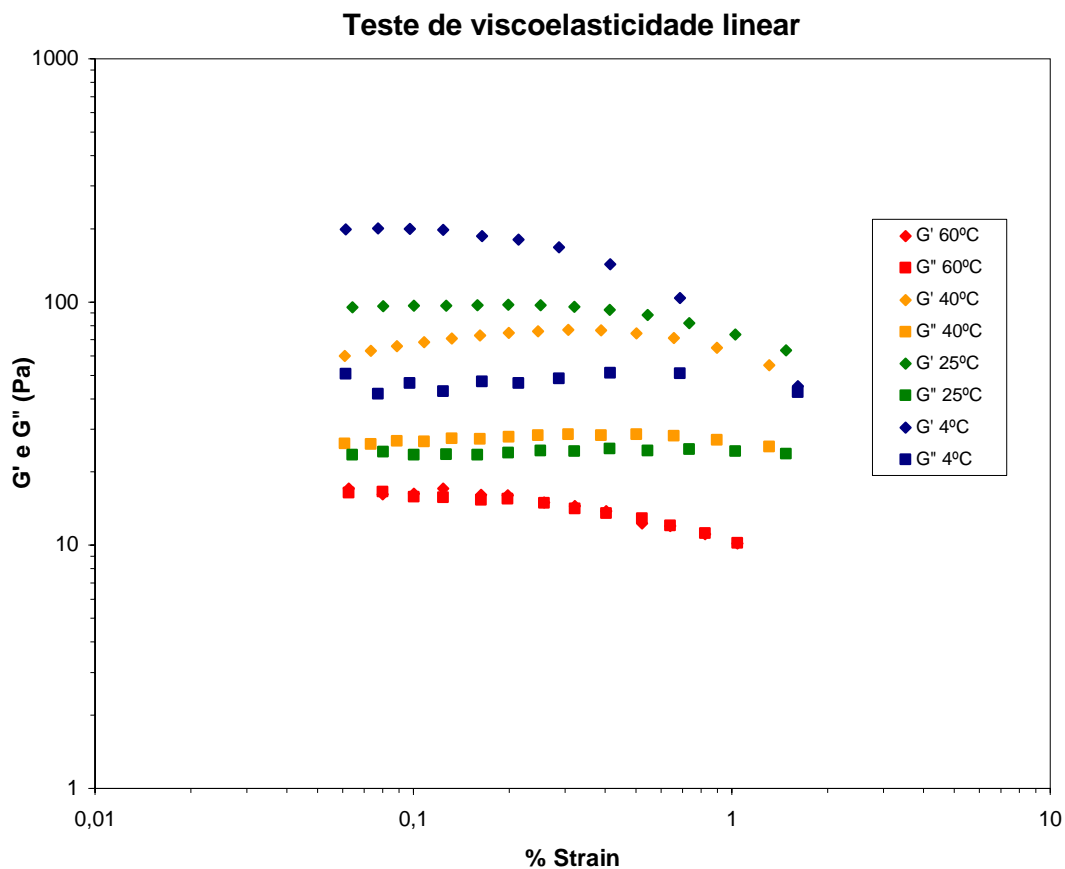


Figura 14: G' e G'' em função da deformação em diversas temperaturas.

6.1. Efeito da temperatura

A Figura 15 mostra a variação da viscosidade com a taxa de deformação antes e após a gelificação (comparação entre as etapas 1 e 5). Em todas as temperaturas, observa-se que a viscosidade aparente decresce exponencialmente com a taxa de deformação. Ou seja, com o aumento da taxa de cisalhamento, as partículas alinham-se na direção do escoamento, isto é, paralelamente à força que o sustenta. Com isso, o fluido de perfuração do presente trabalho caracteriza-se como pseudoplástico.

Vê-se uma repetitividade bastante satisfatória das curvas, o que indica que o fluido recuperou suas propriedades após o repouso (etapa 3). O mesmo comportamento foi observado em todas as temperaturas.

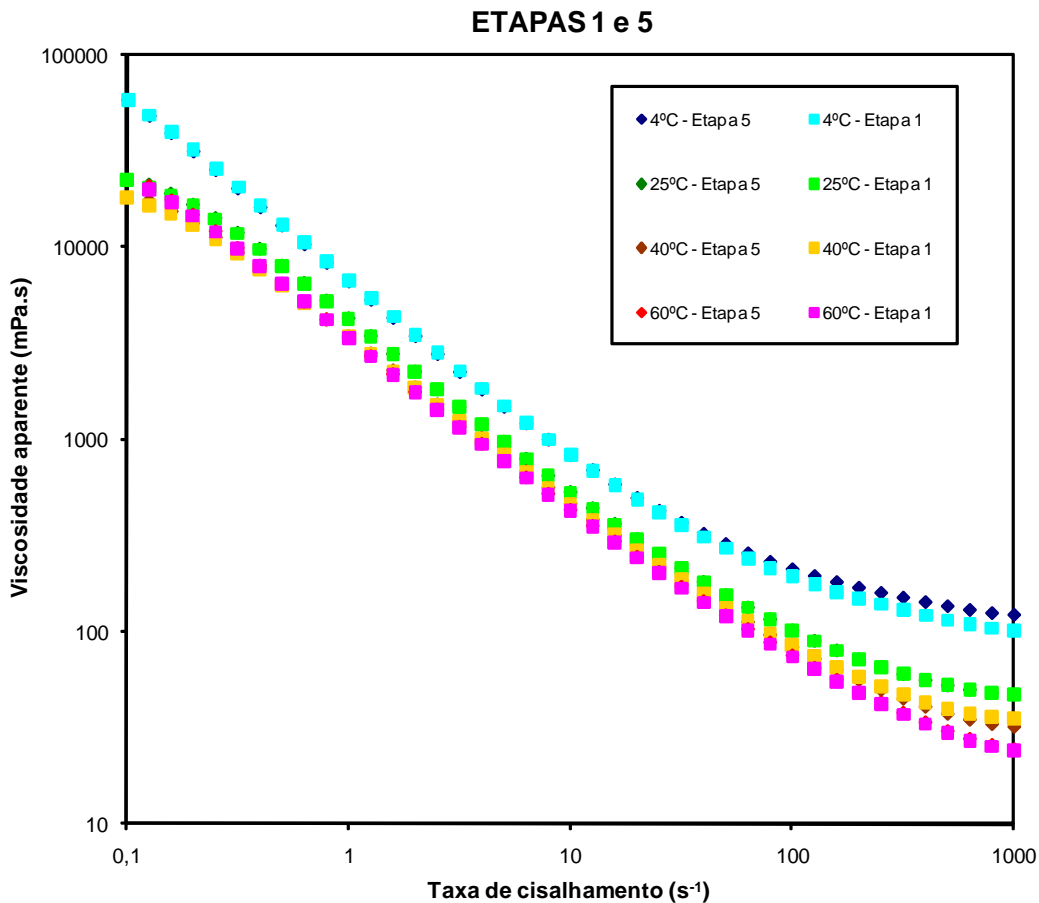


Figura 15: Rampas de cisalhamento em diversas temperaturas antes e após o tempo de repouso.

Na Figura 16, o crescimento do módulo elástico mostra a progressão do gel com o tempo. Observa-se que os valores do módulo elástico são sempre superiores ao módulo viscoso, o que significa que o fluido encontra-se de fato gelificado.

Em princípio esperava-se que os módulos diminuíssem à medida que a temperatura do experimento fosse maior, indicando que a estrutura gelificada torna-se mais fraca e, portanto, mais fácil de quebrar. Entretanto, a figura mostra a elevação dos módulos com a temperatura. Isso pode ser explicado pelo tempo e velocidade de agitação na homogeneização da amostra, discutido mais adiante no item 6.3, e também pode ser devido

à presença do modificador reológico (geralmente polímeros) que pode ter causado esse efeito nos resultados.

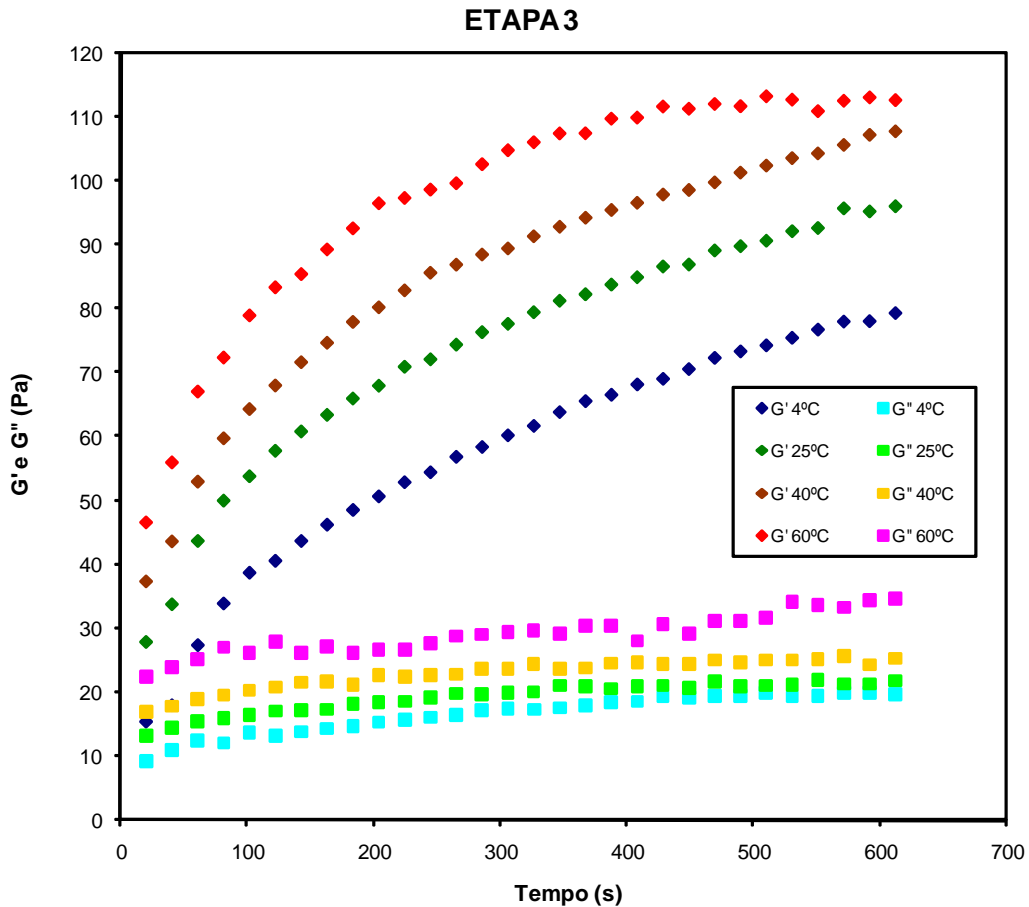


Figura 16: Influência da temperatura na formação do gel.

Após os dez minutos de repouso da etapa 3 (mostrada na Figura 16), é necessária uma energia extra para que a estrutura gelificada seja quebrada e o fluido seja posto em movimento novamente. Essa energia é evidenciada pelo pico de viscosidade inicial observado em todas as temperaturas. Em uma perfuração real, esse pico de viscosidade se traduz em um pico de pressão no interior do poço.

De acordo com a Figura 17, o pico observado é significativamente maior no caso da temperatura de 4°C, o que mostra que no riser, a gelificação é muito mais intensa e reduz-se

drasticamente à medida que a temperatura aumenta. É importante frisar que a diferença entre as viscosidades aparentes aumenta à medida que a temperatura diminui.

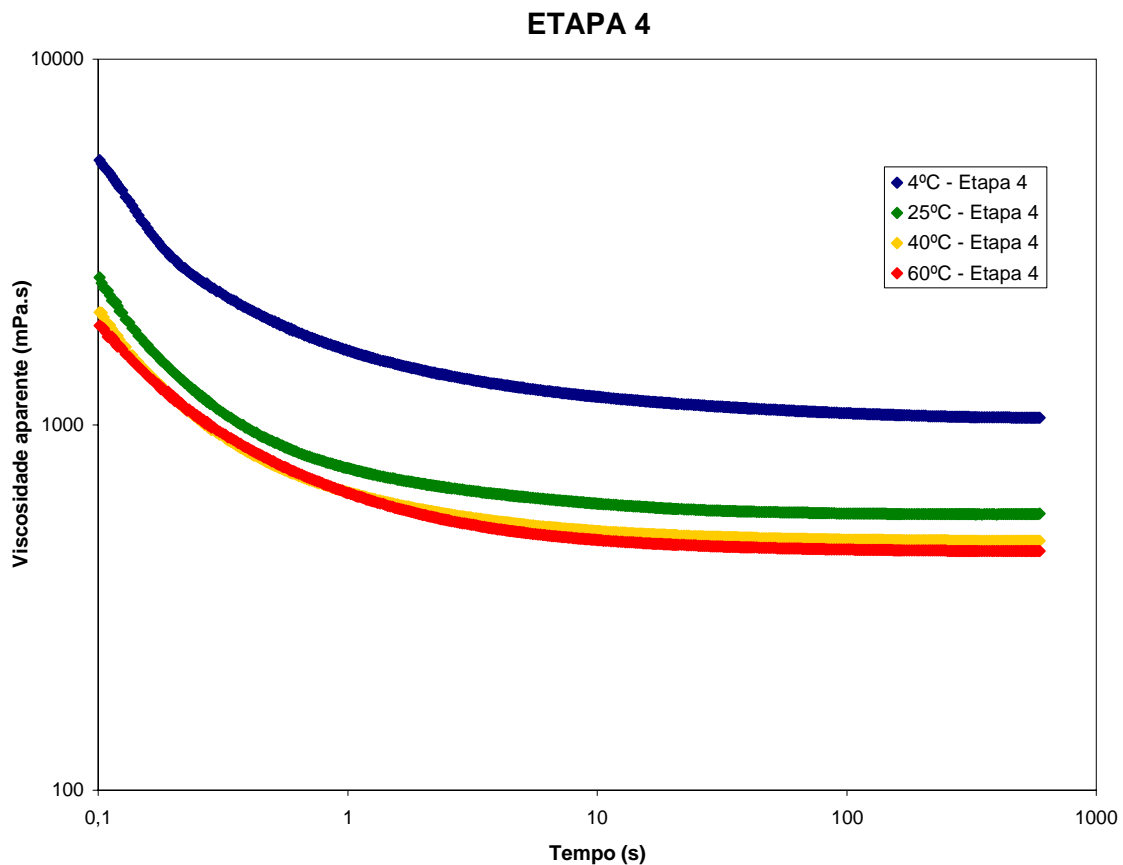


Figura 17: Comportamento da viscosidade aparente após o tempo de repouso.

As Tabelas 3 e 4 mostram o efeito da temperatura sobre os valores médios da viscosidade para as etapas 4 e 5, respectivamente, onde DP significa desvio-padrão e CV coeficiente de variação (desvio-padrão sobre a média). A partir da Tabela 3, pode-se perceber que os maiores desvios-padrão encontrados foram para a temperatura de 4°C, mas ainda assim, todas as análises apresentaram coeficientes de variação menores que 10%. Já na Tabela 4, os maiores desvios-padrão foram observados na taxa de cisalhamento de $0,1s^{-1}$, mas também, nesse caso, todas as análises apresentaram coeficientes de variação menores que 10%.

As Figuras 18 e 19 mostram os gráficos das médias, provenientes da ANOVA, para analisar o efeito da temperatura sobre a viscosidade para as etapas 4 e 5, respectivamente. Usando o teste LSD (Least Significant Difference) para a etapa 4, verificou-se que a viscosidade aparente não apresentou diferença estatisticamente significativa (nível de significância igual ou maior que 5%) somente entre as temperaturas 40°C e 60°C. Para a etapa 5, não houve diferença estatisticamente significativa da viscosidade aparente a partir da taxa de cisalhamento de $10s^{-1}$, ou seja, a partir dessa taxa a temperatura apresentou pouca influência na viscosidade aparente.

Tabela 3: Efeito da temperatura na etapa 4 sobre os valores médios da viscosidade

Temperatura (°C)	Tempo de análise (s)														
	0,1			10			100			300			600		
	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV
4	5293,5	144,1	0,027	1190,8	7,1	0,006	1075,5	9,1	0,009	1050,3	10,0	0,010	1043,5	10,7	0,010
25	2528,0	50,9	0,020	608,1	5,9	0,010	571,8	5,7	0,010	568,6	5,6	0,010	571,4	3,8	0,007
40	2027,8	55,5	0,027	511,9	2,9	0,006	485,1	2,2	0,005	482,0	1,8	0,004	481,4	1,9	0,004
60	1867,3	46,3	0,025	483,7	2,6	0,005	455,5	2,4	0,005	451,7	2,7	0,006	451,0	2,8	0,010

Tabela 4: Efeito da temperatura na etapa 5 sobre os valores médios da viscosidade

Temperatura (°C)	Taxa de cisalhamento (1/s)														
	0,1			1			10			100			1000		
	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV
4	58420,0	1463,2	0,025	6622,0	50,2	0,008	824,5	4,1	0,005	210,4	1,0	0,005	121,7	0,8	0,006
25	23402,5	1158,0	0,049	4284,8	40,2	0,009	533,2	4,9	0,009	101,5	1,0	0,010	46,9	0,5	0,011
40	19387,5	1839,9	0,095	3425,8	27,5	0,008	459,9	1,6	0,003	82,5	0,2	0,002	31,8	0,2	0,004
60	24602,5	1900,7	0,077	3392,0	26,1	0,008	430,6	3,2	0,007	75,2	0,4	0,006	24,4	0,2	0,007

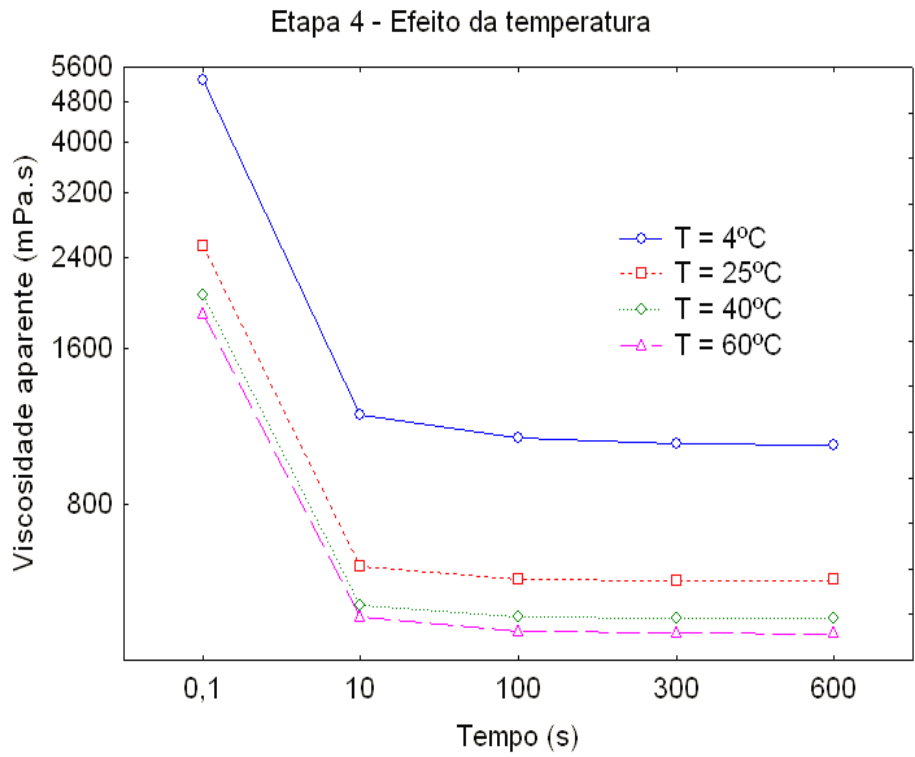


Figura 18: Análise estatística do efeito da temperatura na etapa 4.

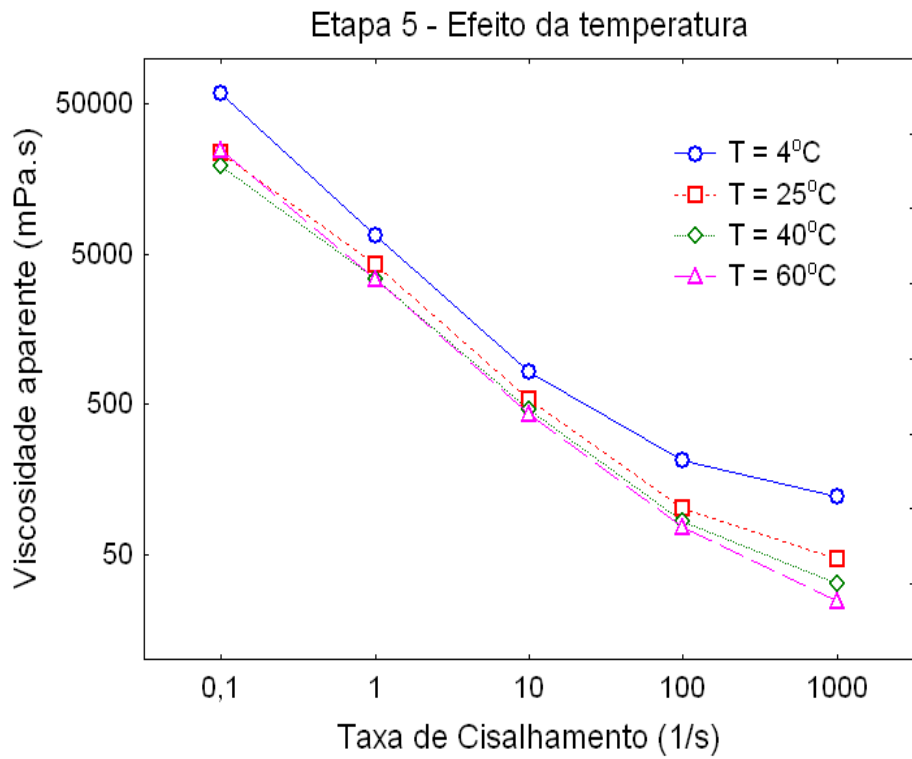


Figura 19: Análise estatística do efeito da temperatura na etapa 5.

6.2. Efeito do tempo de repouso

De modo a verificar a influência do tempo de repouso na viscosidade, vários tempos de repouso foram analisados. Com isso, a Figura 20 mostra a variação da viscosidade com a taxa de deformação antes e após a gelificação (comparação entre as etapas 1 e 5). Como também foi observado na Figura 15, a viscosidade aparente decresce exponencialmente com a taxa de deformação.

Aqui também se vê uma repetitividade bastante satisfatória das curvas, o que indica que o fluido recuperou suas propriedades após o repouso (etapa 3), independente do tempo de repouso. Assim, o fluido apresentou o mesmo tipo de comportamento em função da tensão de cisalhamento, independente do tempo de cisalhamento dinâmico (simulação do tempo de repouso).

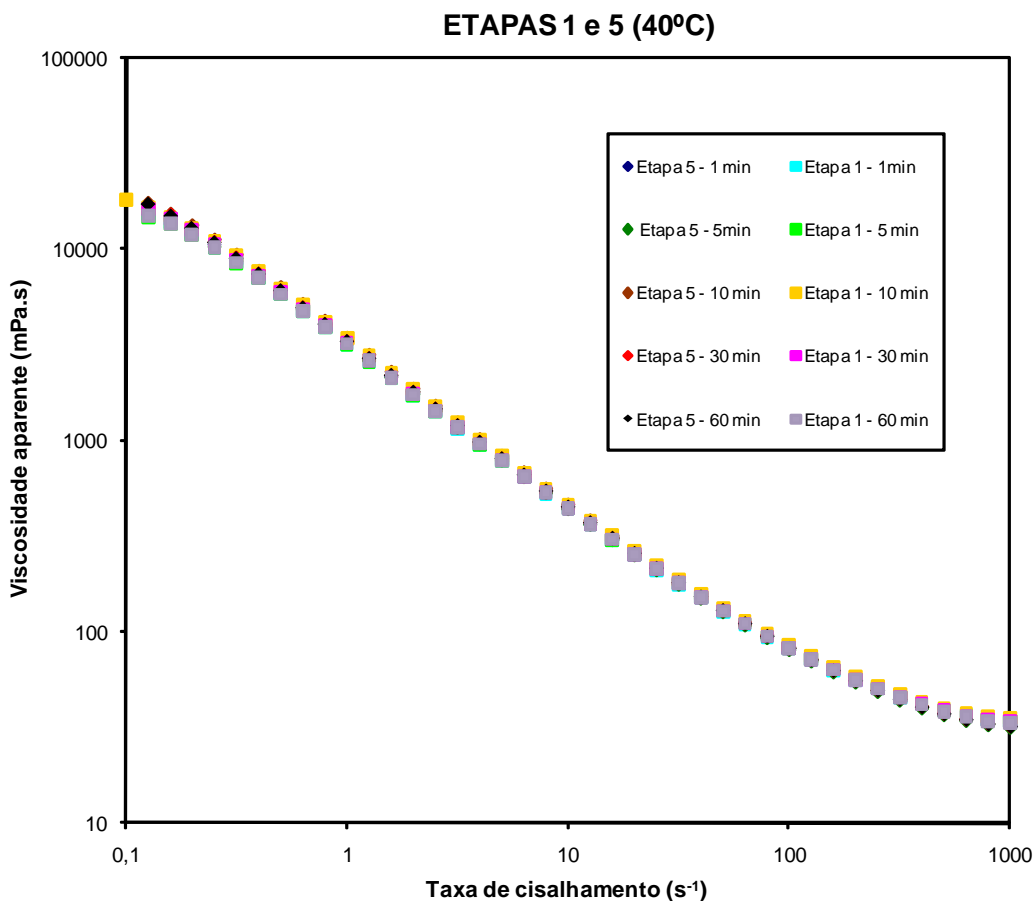


Figura 20: Rampas de cisalhamento antes e após diversos tempos de repouso.

De acordo com a Figura 21, foi observado que para o tempo de repouso de 1 minuto o pico de viscosidade obtido foi significativamente menor do que para os outros tempos estudados que apresentaram valores próximos, sendo o maior deles para o tempo de repouso de 30 minutos. Isso sugere que, em uma perfuração real, o pico de pressão sentido no fundo do poço será significativamente maior se o tempo de interrupção do escoamento do fluido de perfuração for superior a 1 minuto. Diferentemente do comportamento com a taxa cisalhante, a viscosidade aparente em função do tempo de cisalhamento muda com o tempo de repouso.

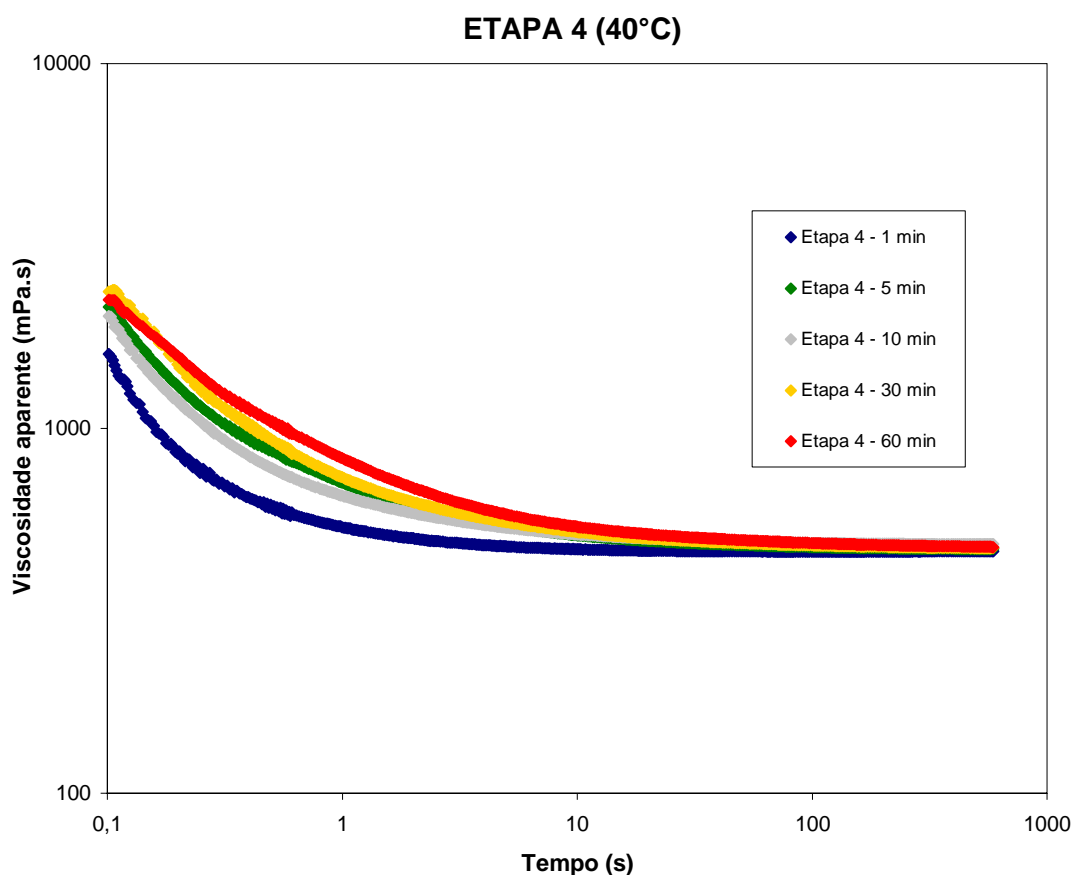


Figura 21: Comportamento da viscosidade aparente após os tempos de repouso.

As Tabelas 5 e 6 mostram o efeito do tempo de repouso sobre os valores médios da viscosidade para as etapas 4 e 5, respectivamente. A partir da Tabela 5, pode-se perceber

que os maiores desvios-padrão encontrados foram para o tempo de análise de 0,1s, mas ainda assim, a grande maioria das análises apresentou coeficientes de variação (desvio-padrão dividido pela média) menores que 10%. Já na Tabela 6, os maiores desvios-padrão foram observados na taxa de cisalhamento de $0,1s^{-1}$, e, nessa taxa, alguns coeficientes de variação foram superiores a 10%. À medida que a taxa de cisalhamento foi aumentada, os valores dos desvios-padrão diminuíram e os seus respectivos coeficientes de variação foram inferiores a 10%.

As Figuras 22 e 23 mostram os gráficos das médias, provenientes da ANOVA, para analisar o efeito do tempo de repouso sobre a viscosidade para as etapas 4 e 5, respectivamente. Usando o teste LSD (Least Significant Difference) para a etapa 4, verificou-se que a partir de 10s de análise a viscosidade aparente não apresentou diferença estatisticamente significativa. Para a etapa 5, não houve diferença estatisticamente significativa da viscosidade aparente em todas as taxa de cisalhamento analisadas, ou seja, para essa etapa, a viscosidade aparente não é influenciada pelo tempo de repouso.

Tabela 5: Efeito do tempo de repouso na etapa 4, a 40°C, sobre os valores médios da viscosidade

Tempo de repouso (min)	Tempo de análise (s)														
	0,1			10			100			300			600		
	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV
1	1596,3	17,7	0,011	466,0	1,5	0,003	459,2	1,6	0,004	460,0	1,5	0,003	460,5	1,3	0,003
5	2155,0	227,4	0,106	509,4	33,5	0,066	472,8	12,0	0,025	467,6	7,7	0,016	466,4	5,9	0,013
10	2027,8	55,5	0,027	511,9	2,9	0,006	485,1	2,2	0,005	482,0	1,8	0,004	481,4	1,9	0,004
30	2379,3	102,8	0,043	520,9	2,0	0,004	477,7	2,5	0,005	471,6	2,5	0,005	469,7	2,5	0,005
60	2263,3	52,2	0,023	537,3	2,3	0,004	485,1	3,3	0,007	476,3	3,4	0,007	473,5	3,3	0,007

Tabela 6: Efeito do tempo de repouso na etapa 5, a 40°C, sobre os valores médios da viscosidade

Tempo de repouso (min)	Taxa de cisalhamento (1/s)														
	0,1			1			10			100			1000		
	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV	MÉDIA	DP	CV
1	18322,5	1495,7	0,082	3234,8	8,6	0,003	441,6	1,4	0,003	80,9	0,3	0,004	31,9	0,1	0,004
5	17900,0	2624,9	0,147	3276,0	55,4	0,017	446,7	5,2	0,012	81,4	0,6	0,008	31,8	0,3	0,010
10	19387,5	1839,9	0,095	3425,8	27,5	0,008	459,9	1,6	0,003	82,5	0,2	0,002	31,8	0,2	0,004
30	19555,0	2461,0	0,126	3303,3	21,0	0,006	448	3,6	0,008	81,3	0,9	0,011	31,8	0,3	0,008
60	19722,5	3296,6	0,167	3330,8	18,1	0,005	452,7	2,7	0,006	82,2	0,7	0,009	32,0	0,4	0,013

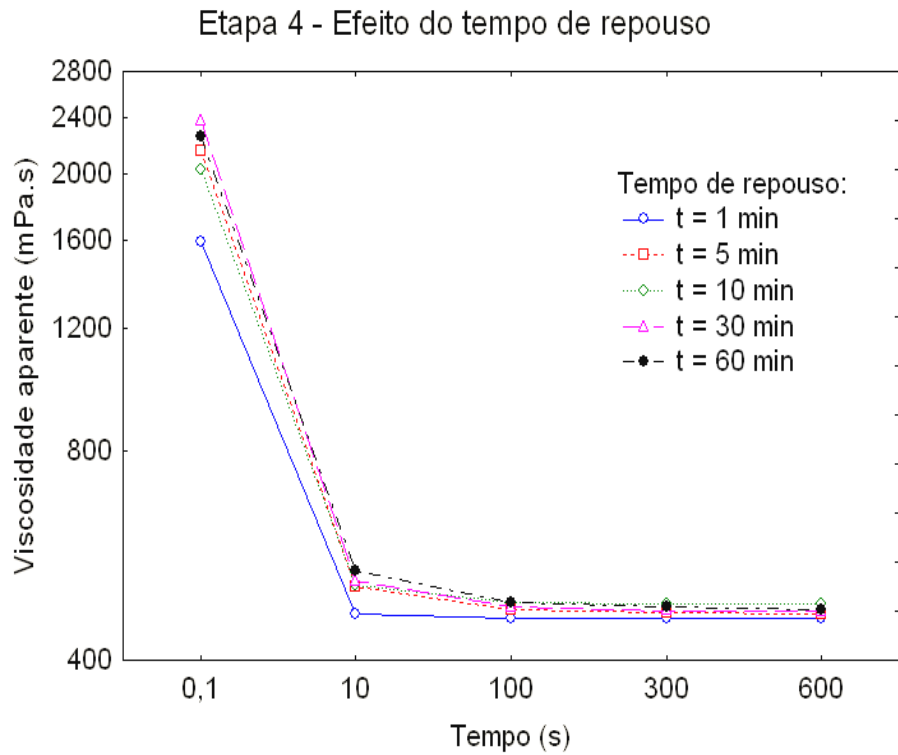


Figura 22: Análise estatística do efeito do tempo de repouso na etapa 4, a 40°C.

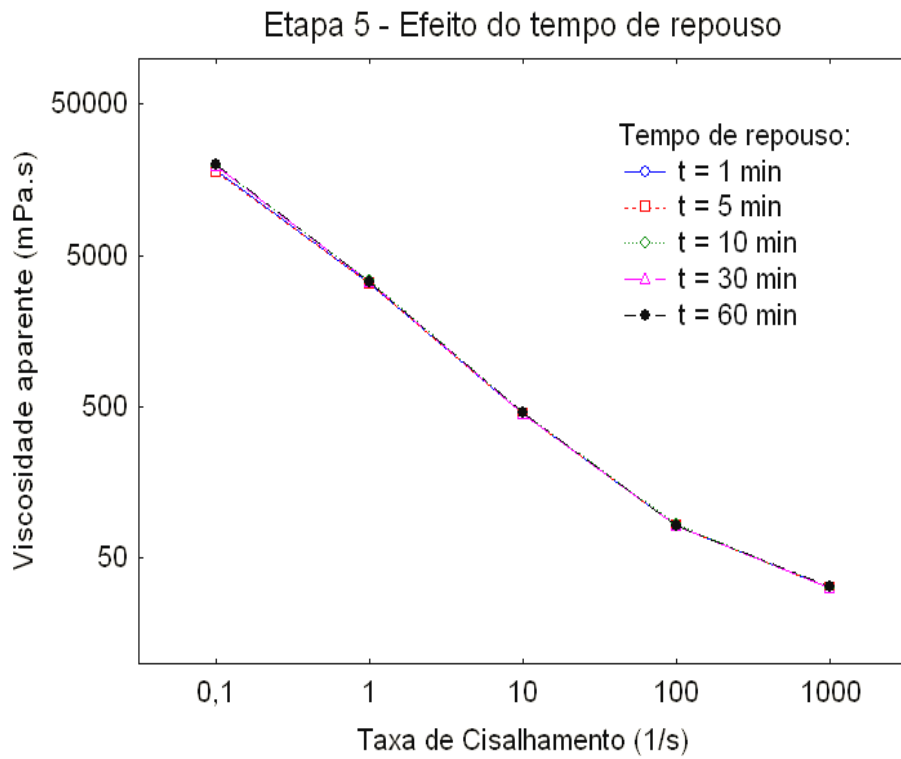


Figura 23: Análise estatística do efeito do tempo de repouso na etapa 5, a 40°C.

6.3. Efeito da homogeneização da amostra

Devido aos resultados obtidos no estudo do efeito da temperatura e do tempo de repouso na formação do gel e dos picos de viscosidade, levantou-se a possibilidade de que a homogeneização do fluido antes da realização do experimento poderia ter interferido nos resultados. Logo, para avaliar essa influência foi adotado o procedimento descrito no item 5.2.3.

Esse novo estudo foi realizado com o mesmo procedimento de 5 etapas, nas temperaturas de 4, 40 e 60°C, com 10 minutos para o tempo de repouso (etapa 3).

Pelos resultados obtidos e mostrados nas Figuras 24, 25 e 26, é possível perceber que o método de homogeneização proposto influi diretamente na formação do gel. Um fato interessante nos resultados é que a amostra submetida a 12000 rpm e temperatura de teste de 4°C apresentou o módulo elástico maior do que a amostra sem essa agitação, enquanto que para as outras temperaturas acontece o contrário. Isso pode sugerir que uma forte agitação pode ser prejudicial a baixas temperaturas, pois o fluido se encontra mais gelificado e pode haver um pico de pressão numa retomada de circulação. Ao analisar a Figura 25 é possível verificar que isso realmente ocorre, pois a amostra a 4°C submetida à agitação de 12000 rpm apresentou a maior viscosidade entre todas as amostras.

Na Figura 26, pode-se perceber que a agitação da amostra pouco influenciou na variação da viscosidade com a taxa de deformação, com uma repetitividade bastante satisfatória das curvas, indicando que o fluido de fato recuperou suas propriedades após o repouso.

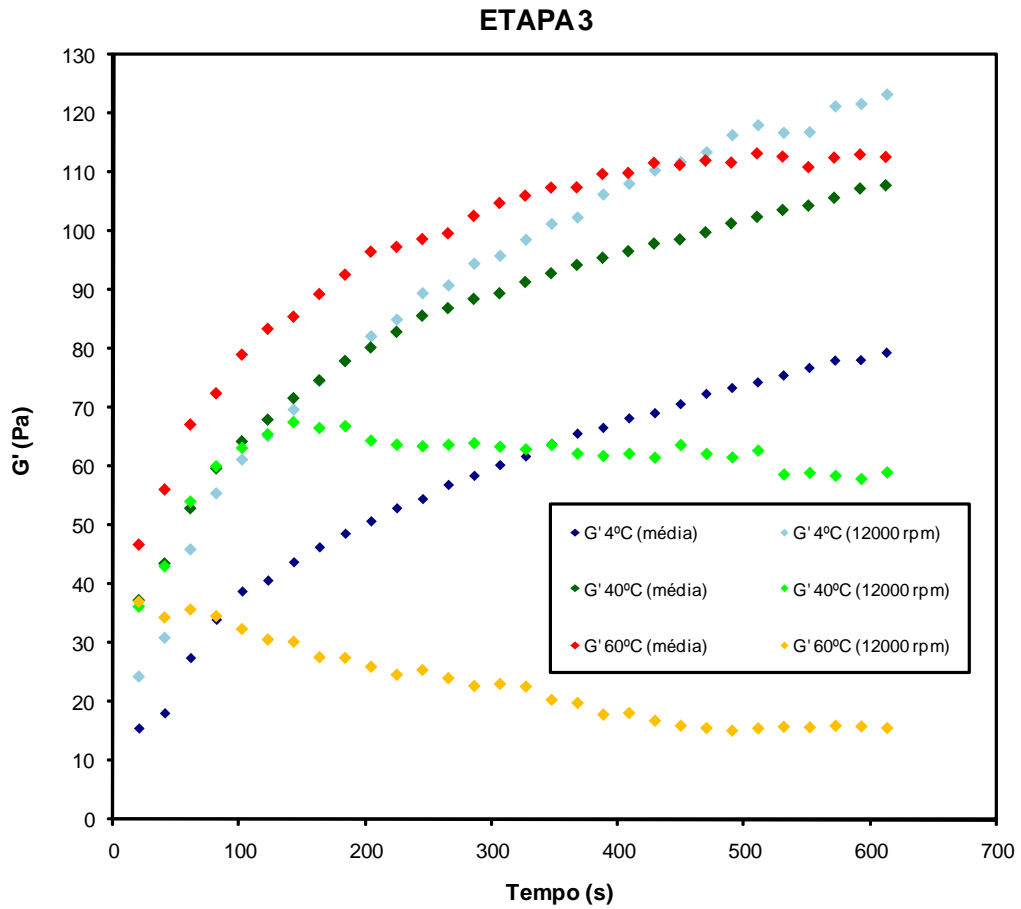


Figura 24: Influência da temperatura e da homogeneização da amostra na formação do gel: tempo de repouso de 10 minutos.

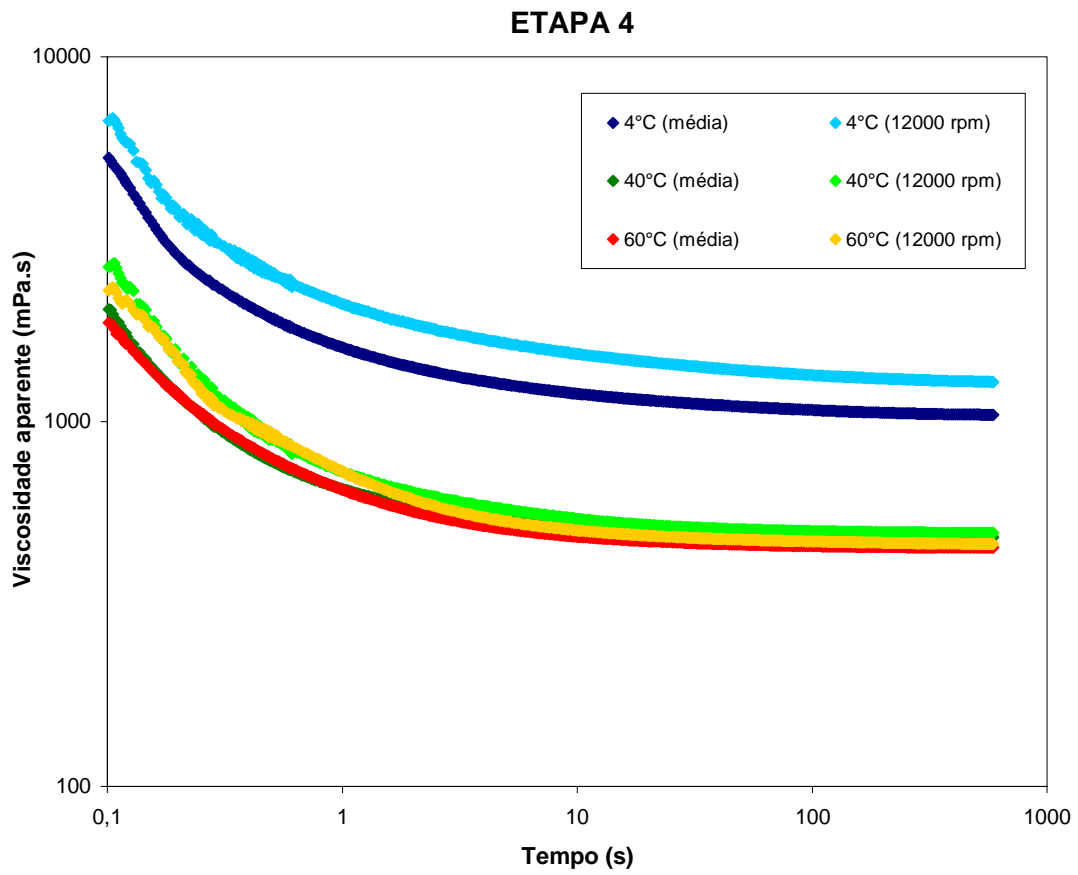


Figura 25: Comportamento da viscosidade aparente após o tempo de repouso.

ETAPA 5

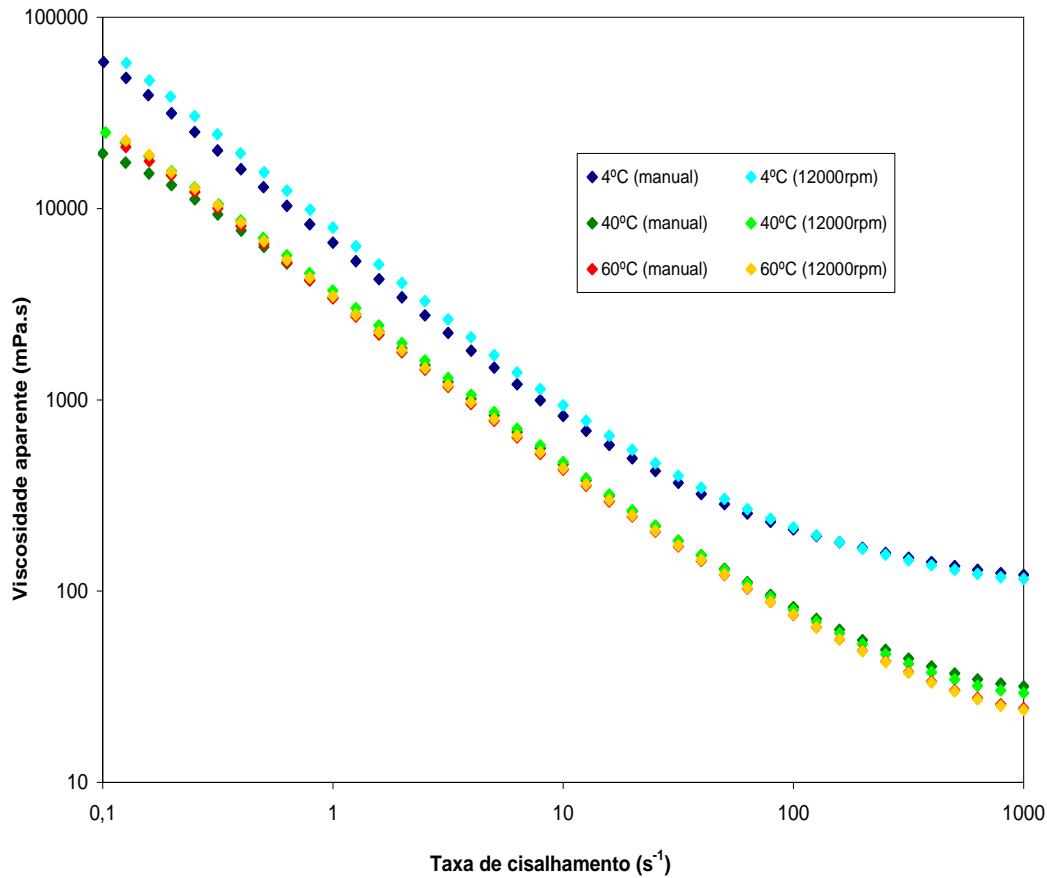


Figura 26: Rampa de cisalhamento após diversos tempos de repouso.

7. Conclusão

A viscosidade aparente decresce exponencialmente com a taxa de deformação, ou seja, com o aumento da taxa de cisalhamento, as partículas alinham-se na direção do escoamento, isto é, paralelamente à força que o sustenta. Com isso, o fluido de perfuração do presente trabalho caracteriza-se como pseudoplástico.

Foi obtida uma boa repetitividade das curvas de viscosidade versus taxa de deformação antes e após a gelificação, indicando que o fluido recupera suas propriedades após o repouso.

O crescimento do módulo elástico indicou que houve a progressão do gel com o tempo, e pelo fato dos valores do módulo elástico serem superiores ao módulo viscoso em

todos os testes pode-se concluir que ocorreu o fenômeno da gelificação, quando foi simulada a interrupção do escoamento do fluido.

Em princípio esperava-se que os módulos diminuíssem à medida que a temperatura do experimento fosse maior, indicando que a estrutura gelificada tornava-se mais fraca e, portanto, mais fácil de quebrar. Entretanto, ocorreu a elevação dos módulos com a temperatura. Isso pode ser explicado pelo tempo e velocidade de agitação na homogeneização da amostra e também pode ser devido à presença do modificador reológico que pode ter causado esse efeito nos resultados.

Os picos de viscosidade, após o repouso, diminuíram com o aumento da temperatura. Isso, em situações reais, significa picos de pressão menores, o que minimiza os riscos da operação, pois se reduz a possibilidade de se atingir a pressão de fratura da formação quando a bomba for religada. Contudo, o pico observado a 4°C foi significativamente maior, mostrando que no riser a gelificação é mais intensa. Isso sugere que, em uma perfuração real, o pico de pressão sentido no fundo do poço quando se reinicia a circulação deve-se predominantemente à quebra do gel no riser.

Para o tempo de repouso de 1 minuto, o pico de viscosidade obtido foi significativamente menor do que para os outros tempos estudados, implicando que o pico de pressão sentido no fundo do poço será significativamente maior se o tempo de interrupção do escoamento do fluido de perfuração for superior a 1 minuto. Para tempos de parada compreendidos entre 5 e 60 minutos, os picos de viscosidade apresentaram valores próximos, ou seja, há uma margem de segurança em executar operações que necessitem de uma interrupção do bombeio de até pelo menos 60 minutos, pois não haverá risco de um pico excessivamente grande na retomada da circulação.

Foi possível também concluir que a forma de homogeneização do fluido antes da realização do experimento influenciou diretamente na formação do gel e também na viscosidade aparente na retomada da circulação, principalmente a baixas temperaturas, podendo haver picos de pressão devido às elevadas viscosidades.

8. Sugestões

- Estudar a influência da temperatura em tempos de repouso mais longos (duas horas ou mais).
- Estudar a influência do tempo de repouso nas outras temperaturas citadas no trabalho (4°C, 25°C e 60°C) ou mesmo em outras temperaturas.
- Estudar, se possível, a influência da pressão no fenômeno de gelificação e nos picos de viscosidade.
- Estudar a influência da homogeneização da amostra na formação do gel e encontrar uma velocidade de agitação ótima para a mesma.
- Estudar a influência de um tempo superior a 10 minutos nas etapas onde o fluido é submetido a uma taxa de cisalhamento constante.
- Estudar a influência da composição do fluido no fenômeno de gelificação e nos picos de viscosidade.

9. Referências bibliográficas

- Annis, M.R. High-temperature flow properties of water-base drilling fluids. **Journal of Petroleum Technology**, p. 1076, ago. 1967.
- Barros, Alessandro O. **Estabelecimento de Correlações estrutura propriedades de acetais para fluidos de perfuração**. 2007. 133f. Dissertação (Mestrado em Química Orgânica) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Caenn, R.; Chillingar, G. V. Drilling fluids: State of the art. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v.14, p. 221, jun. 1995.
- Carneiro, Danilo G. P. **A injeção de esferas de baixa densidade na base do riser no processo de duplo gradiente de perfuração: estudo com auxílio de fluidodinâmica**

computacional. 2006. 86f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- Castro, Alberto G.; Covas, José A.; Diogo, Antônio C. In: **Reologia e suas aplicações industriais**. Lisboa: Instituto Piaget, 2001. p. 116.

- Correia, Denise Z. **Estudo de misturas poliméricas para recuperação de petróleo**. 2006. 201f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- Egawa, Edgar Y. **Caracterização térmica e reológica de blendas de glicerol: Colágeno Tipo I de diferentes tecidos**. 2007. 106f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- Ferreira, Heber S. et al. **Produção em escala piloto de argilas organofílicas visando uso em fluidos de perfuração base óleo**. Rio Oil and Gas Expo Conference 2008. p. 2. set. 2008.

- Fox, Robert W.; McDonald, Alan T. In: **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2001. p. 11-18.

- Gandelman, Roni A. et al. **Estudo sobre gelificação em fluidos de perfuração**. Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás. p. 1. ago. 2006.

- Haminiuk, Charles W.I. **Comportamento reológico e fracionamento péctico das polpas integrais de araçá (*Psidium cattleianum sabine*) e amora-preta (*Rubus spp*)**. 2005. 85f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- Kiryu, Hamilton S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**. 2006. 204f. Dissertação (Mestrado em Ciências Térmicas) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- Machado, José C. M. In: **Reologia e escoamento de fluidos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. p. 1-100.
- Marinescu, P. **High-pressure/High-temperature operations: aqueous drilling fluid contends with HP/HT wells**. Disponível em: <<http://www.epmag.com/Magazine/2008/9/item8256.php>>. Acesso em: 19 de agosto 2009.
- Monteiro, Vitor A. R. et al. **Estudo das propriedades reológicas de fluidos de perfuração de poços em águas profundas**. Anais do II Encontro Brasileiro de Reologia. p. 57. 2004.
- Munson, Bruce R.; Young, Donald F.; Okiishi, Theodore H. In: **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. p. 13.
- Nascimento, Christine R. **Reologia e reometria aplicada ao estudo de polpas minerais**. Série Rochas e Minerais Industriais - CETEM/MCT. v. 12, p. 9-28. 2008.
- Ochoa, Marilyn V. **Analysis of drilling fluid rheology and tool joint effect to reduce errors in hydraulics calculations**. 2006. 177f. Tese (Doutorado em Engenharia de Petróleo), Texas A&M University, EUA. Disponível em: <<http://txspace.tamu.edu/handle/1969.1/4334>>. Acesso em: 24 de março de 2008.
- Oliveira, G.M. et al. **Estudo do início da recirculação de fluidos de perfuração gelificados**. Rio Oil and Gás Expo Conference 2008. p. 1-8.
- Sato, Ana C. K. **Influência do tamanho de partículas no comportamento reológico da polpa de jabuticaba**. 2005. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- Schramm, G. In: **Reologia e Reometria – Fundamentos teóricos e práticos**. Rio de Janeiro: Artliber, 2006. p. 25-29.
- Souza, Carlos E.C. **Ensaio sobre os mecanismos de ação de aditivos poliméricos em fluidos de perfuração**. 2007. 231f. Tese (Doutorado em Química Orgânica) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Thomas, José E. In: **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. São Paulo: Interciência; 2001. p. 80-81.
- Toscano, Bruno V. **Investigação do comportamento reológico de óleos lubrificantes na zona de vedação de selos mecânicos**. 2005. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- <<http://www.shs.eesc.usp.br/graduacao/disciplinas/shs103/aula3.pdf>>. Acesso em: 28 de maio de 2009.