

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE FLUIDOS COMPLEXOS

Camila Moreira Costa, camila.moreira.costa@hotmail.com

Orientadoras: Monica Feijó Naccache e Priscilla Varges

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

Submetido em 30/07/2017

Revisado em 02/08/2017

Aprovado em 10/11/2017

Resumo: A partir de caracterizações realizadas com o auxílio de um reômetro rotacional, foram obtidas inúmeras caracterizações de fluidos não Newtonianos. Testes de varredura de tensão, varredura no tempo, degrau de tensão, curva de escoamento e tensão constante foram feitos para Carbopol base água na concentração de 0,1 % e de um tampão viscoso proveniente da Indústria de petróleo. Ambos os fluidos caracterizados se adequaram ao modelo de Hershey-buckley e houve comprovação da presença de efeitos tixotrópicos e efeitos viscoelásticos próximo à tensão limite de escoamento. Também foi realizada uma análise comparativa entre Carbopol base água e Carbopol base glicerina e constatou-se que é necessária uma maior quantidade de pó de Carbopol no segundo caso para que ambos os fluidos atinjam a mesma tensão limite de escoamento.

Palavras chave: Carbopol, Fluido não Newtoniano, Tixotropia, Viscoelástico

Abstract: Starting with characterizations performed with the aid of a rotational rheometer, numerous characterizations of non-Newtonian fluids were obtained. Stress Sweep, time sweep, step change, flow curve and creep were made for Carbopol base water at a concentration of 0.1% and a viscous cap from the Petroleum Industry. Both characterized fluids adapted to the Hershey-buckley model and there was an evidence of the thixotropic effects and viscoelastic effects close to the shear stress limit. A comparative analysis was also performed between Carbopol base water and Carbopol base glycerin and it was noted that a greater amount of Carbopol powder is required in the second case so that both fluids reach the same shear stress limit.

Keywords: Carbopol, Non-Newtonian fluid, Tixotropia, Viscoelastic

Introdução

Inúmeras operações nas indústrias utilizam fluidos com características complexas. O estudo completo do comportamento mecânico e da natureza de cada um desses fluidos é necessário para determinar suas aplicações em procedimentos como dimensionamento de bombas, tubulações, trocadores de calos, misturadores, entre outros. Os fluidos podem ser classificados como newtoniano ou não newtoniano.

Os fluidos newtonianos são considerados fluidos ideais, pois apresentam propriedades bem definidas e seguem o modelo proposto pela Lei de Newton da viscosidade. Esses fluidos possuem a viscosidade variando com a temperatura e pressão, no entanto, essa propriedade é constante quando se varia a deformação, a tensão aplicada sobre o líquido e o tempo. Apesar de ter características próximas da idealidade, representam uma grande gama de fluidos em condições normais, como por exemplo, a água e ar. Além dessas peculiaridades, o fluido considerado newtoniano não apresentará qualquer tipo de elasticidade e anomalias extensivas.

Os fluidos não newtonianos ou complexos, diferentemente dos ideais, não apresentam relação única entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento. Em geral estes fluidos possuem viscosidade dependente da cinemática do escoamento. Além disso, eles podem ser divididos em diferentes grupos, sendo classificados como inelásticos ou puramente viscosos, dependentes ou não do tempo, e viscoelásticos. Para entender o comportamento de cada um desses fluidos, é necessário um estudo detalhado das suas características em diversos tipos de escoamento para que seja possível traçar modelos que descrevam o comportamento de cada um deles. Deste modo, pode-se analisar sua aplicabilidade nos diversos procedimentos industriais e otimizar os processos envolvidos.

Viscosidade

A viscosidade pode ser entendida como uma resistência do fluido a um escoamento de cisalhamento, ou seja, quando um fluido é submetido a uma tensão, se ele flui de maneira rápida pode-se dizer que ele é pouco viscoso – como exemplo a água – já se o fluido possui certa resistência a escoar e por isso sua fluidez é baixa, pode-se dizer que ele é um fluido altamente viscoso – como exemplo os óleos. Ela também é uma propriedade que pode ser explicada como um atrito interno das partículas dos fluidos.

A viscosidade para a maioria dos fluidos newtonianos tende a diminuir com o

aumento da temperatura devido ao movimento browniano das moléculas constituintes (quanto maior a viscosidade, maior a taxa de diminuição). No entanto, para a pressão, à medida que esta diminui a viscosidade também cai.

Esse parâmetro pode ser medido com a utilização de um equipamento denominado viscosímetro, que medem a viscosidade somente sob uma condição de fluxo fixa, ou mediante a utilização de um viscosímetro rotativo (reômetro), que mede a viscosidade de fluidos que variam com a cinemática do escoamento (utilizados para os fluidos complexos). No viscosímetro, o fluido é posto para escoar através do equipamento, o arraste propiciado pelo movimento relativo entre o eles é a medida da viscosidade.



Figura 1: Viscosímetro capilar



Figura 2: Viscosímetro rotativo

Comportamento Tixotrópico

Os fluidos que apresentam comportamento tixotrópico têm como característica principal a dependência da viscosidade com o tempo de cisalhamento. Sua estrutura é quebrada à medida que o tempo decorre, fazendo com que a viscosidade caia. Por isso suas propriedades são muito complexas e de difícil determinação.

Tipos de Fluidos

Os materiais podem ser divididos em duas características a partir de um conceito que relaciona taxa de deformação e tensão de cisalhamento, mas eles também podem ser classificados quanto à deformação. Dessa forma, eles podem ser:

- a) Reversíveis ou elásticos -> Obedece à lei de Hooke (uma tensão aplicada a um

corpo sólido causa uma deformação), possuem deformação reversível e não apresentam escoamento.

- b) Irreversíveis ou viscosos ->Obedece à lei de Newton (viscosidade constante), possuem deformação irreversível e apresentam escoamento.

A figura abaixo detalha o esquema de classificações dos tipos de fluidos a partir da divisão entre newtoniano e não newtoniano.

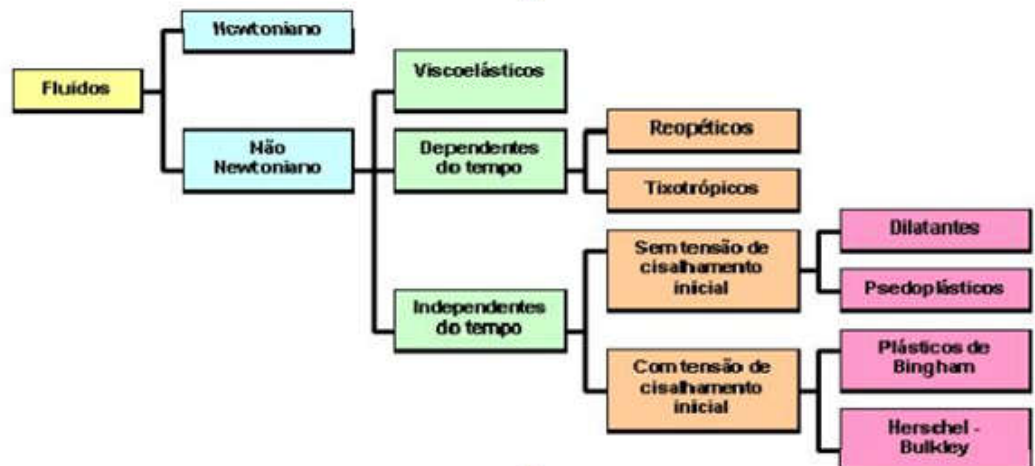


Figura 3: Classificação dos fluidos segundo comportamento reológico

Viscoelasticidade

Muitos materiais apresentam um comportamento mecânico intermediário entre os extremos de materiais puramente viscosos e puramente elásticos. Os fluidos viscoelásticos apresentarão propriedades de ambos. Ou seja, sua equação constitutiva será uma intermediária entre as propostas por Hooke e Newton.

Determinar se um fluido possui comportamento elástico é de suma importância, visto que suas propriedades serão totalmente singulares. Esses materiais surgiram a partir de pesquisas espaciais e encontram-se aplicados em diferentes setores, devido ao fato de terem uma estrutura extremamente adaptável, como por exemplo, na fabricação de colchões e travesseiros. Esses produtos também possuem aplicações na área de saúde, pois possuem ação terapêutica no tratamento de dores e fadiga muscular. A determinação da elasticidade é dada por diferentes parâmetros, dependendo dos diferentes tipos de escoamento a que o fluido será submetido.

Os fluidos viscoelásticos possuem uma memória, ou seja, após sofrerem alguma perturbação, eles tenderão a voltar ao seu lugar de “conforto”. Para entender, pode-se pensar em uma mola quando é alongada e que após ser solta volta para sua posição inicial. Nos fluidos viscoelásticos ocorre a mesma coisa, porém, o retorno para essa posição não sucede de maneira perfeita, já que não é um material elástico perfeito. Pode-se dizer que todo material apresenta um tempo de relaxação característico, que está associado à memória do fluido. Nos fluidos viscoelásticos, o parâmetro que mede esta característica é o número de Deborah. Esse número corresponde à razão de um tempo característico de relaxamento do material sobre um tempo característico de processo de deformação relevante.

Na região de viscoelasticidade linear, para deformações pequenas ou impostas de maneira lenta, os arranjos moleculares nunca estarão longe do equilíbrio e por isso a resposta mecânica será um reflexo molecular para que seja atingido novamente o equilíbrio.

Parâmetros Viscoelásticos

Dois parâmetros são importantíssimos para avaliar a viscoelasticidade de um fluido. São eles o módulo viscoso e o módulo elástico.

O módulo Elástico ou de armazenamento (G') é a medida elástica do material, ou seja, a capacidade que o material possui de armazenar energia. O módulo viscoso ou de perda (G'') determina a capacidade do fluido em dissipar energia pela forma de calor.

Fluidos dependentes do tempo

São fluidos que possuem propriedades que variam no tempo quando submetidos a uma mesma tensão de cisalhamento. Eles podem ser divididos em:

a) Tixotrópicos -> São fluidos que apresentam queda da viscosidade com o tempo quando submetido a uma dada deformação constante. Seu valor retorna ao inicial quando a deformação é interrompida, i.e., a variação de viscosidade é reversível. Exemplo desses fluidos são suspensões concentradas, emulsões e tintas.

b) Reopéticos -> São fluidos que apresentam aumento da viscosidade com

o tempo quando submetidos à deformação constante. Seu valor retorna ao inicial quando a deformação é interrompida, tendo também comportamento reversível. Exemplo desses fluidos é a argila bentonita.

Fluidos independentes do tempo

- Sem tensão limite de escoamento

Pseudoplásticos -> Em repouso apresentam suas moléculas desordenadas, e quando são submetidos a uma tensão, suas moléculas tendem a direcionar-se na direção da mesma. Possuem como característica o fato da viscosidade diminuir com o aumento da taxa de cisalhamento, tendo como exemplos massas de cerâmica e cimento.

Dilatantes -> A viscosidade aumenta quando a taxa de cisalhamento é aumentada. Alguns exemplos são soluções de açúcar e amido.

- Com tensão limite de escoamento

a) Plásticos de Bingham ->. Este fluido possui uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação quando submetido a tensões acima da tensão limite de escoamento. Alguns exemplos são fluidos de perfuração de poços, algumas suspensões de sólidos granulados.

b) Herschel-Bulkley > Acima da tensão limite de escoamento, também possuem uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

Modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos fluidos

Todas as curvas de escoamento podem ser determinadas por modelos matemáticos, que relacionam a taxa de deformação e a tensão durante o escoamento por meio de diversos parâmetros.

Power-Law

O modelo mais simples e mais utilizado nas soluções de engenharia para fluidos puramente viscosos é o chamado Power-law, que pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\eta(\dot{\gamma}) = k \dot{\gamma}^{n-1}$$

Equação 1

Onde,

k= índice de

consistência n= índice

de potência

Observa-se que quando o valor de n corresponde a 1, a viscosidade é dada por uma constante, ou seja, temos um fluido newtoniano. Quando $n > 1$, a viscosidade será diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, então se tem um fluido dilatante. E quando $n < 1$, a viscosidade será inversamente proporcional à taxa de cisalhamento, então se tem um fluido pseudoplástico. Esse modelo apresenta como desvantagem o fato de não descrever o comportamento real dos fluidos nos limites das taxas de cisalhamento, pois quando temos taxas de cisalhamento muito altas, a viscosidade irá tender para o valor nulo (pseudoplástico) ou infinito (dilatantes), enquanto que em taxas muito pequenas, essa viscosidade tenderá ao nulo (dilatantes) ou infinito (pseudoplásticos) e assim não descreverá de maneira correta o comportamento do fluido.

Herschel-Bulckley

O modelo de Herschel-Bulckley descreve fluidos com tensão limite de escoamento. São fluidos estruturados, que tem estrutura muito forte abaixo da tensão limite de escoamento, com viscosidade muito elevada. Ao atingir a tensão limite de escoamento, a estrutura do fluido se quebra, causando uma queda brusca nos níveis de viscosidade. Sua equação é dada abaixo:

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} & \text{se } \tau > \tau_0 \\ \infty & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Equação 2

Quando a tensão está abaixo dessa tensão limite de escoamento, o fluido apresentará viscosidade tendendo a infinito, ou seja, não escoará.

Outro modelo que descreve o comportamento dos fluidos viscoplásticos é o chamado modelo de Bingham. Sua equação corresponde a do modelo de Herschel-Bulckley quando $n=1$.

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_p & \text{se } \tau > \tau_0 \\ \infty & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Equação 3

Onde,

μ_p = viscosidade plástica.

Reômetro Rotacional

Reômetro é um equipamento que mede a relação entre a tensão e deformação ou taxa de deformação para diferentes fluidos, e a partir dessa medida é possível determinar diversos outros parâmetros do material. Existem diversos tipos de geometrias utilizadas nesses reômetros, são elas: cilindros concêntricos, cone e placa e discos paralelos. Sua escolha dependerá da faixa de viscosidade e taxa de cisalhamento que se deseja obter as medidas do experimento, assim como do tipo de fluido.

A geometria de cilindros concêntricos, também chamada de Couette é utilizada para fluidos pouco viscosos com altas taxas de cisalhamento. É imposta uma rotação no cilindro e assim o torque é medido. Alguns problemas de operação podem ser relacionados, como excentricidade (problema causado pelo mau alinhamento dos cilindros que pode culminar numa leitura menor do torque) e deslizamento das paredes (ocorre a altas tensões em polímeros fundidos e baixas tensões em

dispersões).

A geometria de cone e placa pode ser utilizada para altas e baixas viscosidades com escoamento homogêneo, ou seja, taxa de cisalhamento constante. É imposta uma velocidade angular e assim o torque e a força normal são medidos. Suas limitações ocorrem para medidas de fluidos muito viscosos, que pode culminar no escoamento do material na borda do cone para fora da folga. Também pode ocorrer deslizamento de paredes.

A geometria de discos paralelos é mais utilizada para dispersões, é mais fácil de carregar amostras de materiais mais viscosos, e possui escoamento não homogêneo. É imposta uma velocidade de rotação que pode alterar a taxa de cisalhamento e assim o torque e a força normal são medidos. Fluidos muito viscosos podem ter seu material na borda torcido e escoar para a folga. Também pode ocorrer deslizamento de paredes.

Para evitar o problema relacionado a deslizamento de paredes, comum a todas as geometrias, utiliza-se superfícies ranhuradas – altamente rugosas – para reduzir essa adversidade.

Motivação

Fluidos não-newtonianos apresentam comportamento complexo, que deve ser pesquisado e entendido para que sua aplicabilidade aumente cada vez mais, visto que suas características são importantes para o avanço tecnológico em diversos setores, como a indústria petrolífera (segmento no qual o presente trabalho esta inserido), farmacêutica, de cosméticos, entre outras.

Esses fluidos, diferentemente dos newtonianos, não apresentam propriedades bem definidas, como a dependência proporcional da tensão e deformação, dada pela viscosidade. Nos fluidos complexos, a viscosidade pode ser função da cinemática de escoamento e variar no tempo. Além disso, os fluidos podem ter comportamento elástico e dependente do tempo.

Estudar as características reológicas desses fluidos se faz necessária devido a sua vasta aplicabilidade nos mais variados campos da indústria, e por isso, neste trabalho foi realizado um extenso estudo de dois fluidos complexos para que seja possível alcançar resultados que resultem em melhoria de desempenho dos processos industriais que os envolve.

Na indústria do petróleo, na qual o projeto está inserido, existem diversos

processos que são realizados para que seja possível haver a extração do petróleo do poço. É necessária a utilização de fluidos desde o processo inicial - para a perfuração dos poços - até os processos finais, para seu tamponamento. Suas características reológicas como viscosidade, tensão limite de escoamento e taxa de deformação devem ser estudadas em diferentes temperaturas, pressões e tempo, para assim se obter resultados que sejam próximos aos usuais nesses processos. Assim sendo, é possível determinar o melhor fluido a ser empregado para cada processo e otimizar progressivamente os procedimentos evitando custos desnecessários e tempo que poderia ser redirecionado para outros setores.

Objetivo

O objetivo do projeto é realizar um amplo estudo das características reológicas de dois fluidos complexos: Carbopol base água e um tampão viscoso utilizado na indústria do petróleo, a partir da realização de diferentes testes em um reômetro rotacional (AR-G2). Dessa forma, é possível obter-se parâmetros importantes para a aplicabilidade dos mesmos, como viscosidade, tensão limite de escoamento, tixotropia, entre outros. Além disso, será realizada uma breve comparação dos testes do carbopol base água com carbopol base glicerina, a fim de se obter resultados que possam ser futuramente relevantes e iniciar uma pesquisa mais profunda sobre esse tema.

Metodologia

Para caracterizar esses fluidos é utilizado um reômetro rotacional. No presente projeto foi utilizado o reômetro AR-G2, da TA Instruments (Fig. 4).



Figura 4- Reômetro rotacional

Fluidos caracterizados

Nesse projeto foi realizado um estudo completo de dois fluidos, sendo eles carbopol base água e um tampão viscoso proveniente da indústria petrolífera. O carbopol é um polímero hidrossolúvel largamente utilizado na formulação de muitos produtos em diferentes setores industriais, principalmente no de cosméticos (shampoo, gel para cabelo, loção pós-barba, entre outros). Ele é empregado com a finalidade de estabilizar emulsões, formar géis e dar viscosidade em soluções. Para que o carbopol seja preparado corretamente, são necessários alguns dias, visto que, por apresentarem forma de um granulado semi-transparente ou pó branco, devem ficar mais tempo no misturador com o propósito de se obter completa homogeneização e estabilidade do produto final.

A glicerina ou glicerol, utilizado também como solvente do carbopol é um composto orgânico cuja função orgânica é um álcool. É líquida à temperatura ambiente, inodoro e relativamente viscoso. Sua aplicabilidade é múltipla, desde utilização em produtos cosméticos para hidratação de pele e cabelo até a produção de remédios. Em comparação com a água é um fluido mais viscoso e mais denso, além de possuir diferenças nas propriedades químicas.

Tampões viscosos são misturas de alta complexidade de sólidos, líquidos e em alguns casos, gases. Podem ser emulsões, dispersões coloidais e suspensões. O fluido analisado neste projeto é denominado BR-MUL parafínico, adensado com baritina e viscosificado com argila organofílica e apresenta densidade igual a 11 lb/gal (1318.09Kg/m³).

Todos os fluidos estudados apresentam comportamento viscoplástico, ou seja, possuem uma tensão limite de escoamento. Para valores muito acima desta tensão, o fluido escoar e apresenta predominância dos efeitos viscosos, enquanto que em valores abaixo, o fluido não escoar, se comporta como sólido e apresenta predominância dos efeitos elásticos. Na região próxima a tensão limite, o fluido apresenta deformações elásticas e viscosas. Além disso, eles podem apresentar comportamento tixotrópico. .

Materiais Utilizados

- Seringa de vidro
- Agulha de plástico
- Cotonete

- Geometria de placa paralela ranhurada denominada *Cross Hatch - 60 mm steel plate*
- Geometria Couette lisa e rugosa

Para iniciar o processo de caracterização desses fluidos, faz-se necessária, primeiramente, a calibração da geometria que será utilizada no teste a ser realizado. Desta maneira, a geometria é escolhida de acordo com as características dos fluidos em combinação com a propriedade que será avaliada, e é inserida no reômetro para que seja iniciada sua completa calibração.

Após este passo, deve-se realizar a programação do teste que será aplicado. Nessa completa caracterização dos fluidos foram feitos os seguintes testes: Varredura de tensão, Varredura no tempo, Curva de escoamento, Tensão constante e Degrau de tensão. Esses testes serão descritos abaixo:

- Varredura de tensão

É um teste oscilatório com frequência fixa e tensão variando numa faixa determinada.

Seu resultado mostra a variação do módulo elástico (G') e do módulo viscoso (G'') em função da tensão, para definir a região viscoelástica linear (região com combinação dos efeitos viscosos e elásticos), onde as curvas são paralelas. Além disso, é possível determinar qual módulo apresentará maior valor em dada região, e com isso verificar o predomínio dos efeitos viscosos ou elásticos.

- Varredura no tempo

É um teste oscilatório que determina o tempo necessário para que seja atingido o regime permanente a partir da análise de G' e G'' . A frequência e a tensão são mantidas constantes num valor arbitrado dentro da região viscoelástica linear.

Esse teste permite observar o comportamento da microestrutura do material com o decorrer do tempo, problemas de sedimentação, evaporação da amostra e a observação da presença dos efeitos tixotrópicos. Quando os módulos viscoso e elástico são constantes com o tempo, pode-se dizer que os testes apresentam confiabilidade de seus resultados.

- Curva de escoamento

É avaliado o comportamento da tensão e viscosidade em função da taxa de deformação, em regime permanente. Os fluidos analisados seguem o comportamento Herschel-Bulkley, para fluido com tensão limite de escoamento, e viscosidade caindo com a taxa de deformação.

Nesse teste, para que seja feito de modo relativamente mais rápido, avalia-se a curva a partir de taxas de deformação mais altas para mais baixas, pois desta forma, o tempo para atingir o regime permanente é menor, visto que a amostra sofre um pré-cisalhamento. Começando de taxas mais baixas para mais altas, o teste demoraria muito mais tempo para ser executado.

- Tensão constante

O fluido é submetido a uma tensão constante durante um tempo definido e assim é avaliado o comportamento da taxa de cisalhamento. Dessa forma, é possível obter com precisão o valor da tensão limite de escoamento e avaliar efeitos tixotrópicos próximos a essa região.

Nesse teste, o valor encontrado para a tensão limite é mais preciso em comparação com o valor obtido pela curva de escoamento. Isso ocorre, porque o teste da curva de escoamento inicia-se das maiores taxas para as menores, ou seja, a estrutura é pré-cisalhada e propicia medidas menores da tensão crítica, enquanto que no creep (tensão constante) isso não ocorre, tornando o resultado mais preciso.

- Degrau de tensão

Esse teste parte do mesmo princípio que o Creep, porém ele é realizado em dois passos. Primeiramente, submete-se o fluido a uma tensão x durante certo tempo, e em seguida o submete a uma tensão y durante outro período de tempo. Após isso, o caminho inverso também é realizado. Dessa forma é possível visualizar o comportamento do fluido pré-cisalhado a diferentes tensões, ou seja, a construção e reconstrução da microestrutura. É possível verificar nesse teste se o fluido apresenta comportamento viscoelástico e efeitos tixotrópicos.

Investigação do “Gap”

Na geometria de placas paralelas, existe uma folga (“gap”) entre a parte superior e a inferior. No caso do tampão viscoso faz-se necessária a realização de uma investigação a fim de definir a melhor folga em razão do tamanho das partículas presentes no fluido. Muitos autores, a partir de estudos, afirmaram que a escolha da folga deve ser de uma ordem de grandeza maior do que o tamanho das partículas presentes no fluido, e por isso a necessidade da determinação desse parâmetro previamente.

Para que fosse determinada a escolha da folga, foram realizados testes de curva de escoamento nas folgas de 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm e assim foi avaliado qual dos seguintes testes obteve valores que se sobrepuseram. Dessa forma foi escolhido o menor destes valores para evitar gasto desnecessário de fluido.

No caso do carbopol, não foi necessário esse estudo, devido ao fato do preparo do fluido ter sido realizado no mesmo laboratório (diferente do tampão viscoso que foi preparado por uma empresa que forneceu ao laboratório para ser analisado) e o tamanho das partículas serem conhecidos, foi possível inferir que o melhor gap a ser utilizado fosse o de 1,0 mm.

Na sequência, após a programação do procedimento, deve-se zerar o “gap” no caso para que em seguida o fluido seja posto na geometria. Após isso, o fluido é inserido mediante o auxílio de uma seringa de vidro e posto da maneira mais suave possível para que não ocorra pré-cisalhamento do mesmo. As bolhas que aparecerão, inerentemente, devem ser succionadas com a utilização de uma agulha de plástico (já que sua presença poderia causar alterações nos resultados) e então, a folga é abaixada até o valor do “gap” selecionado para o procedimento. Em seguida, é realizada uma limpeza com cotonete do fluido que possivelmente derramará, a fim de que se tenha entre a geometria superior e inferior, no caso da geometria de placas paralelas, o fluido com uma pequena “barriguinha” para fora, o que torna a medida mais eficiente.

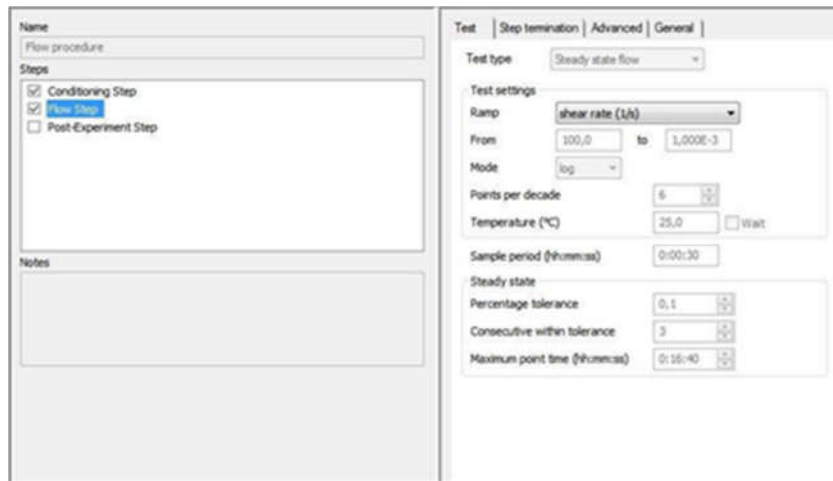


Figura 5: Programação do teste de Curva de escoamento do Carbopol 0,1 %

Escolha da geometria

Na caracterização completa das curvas de escoamento do tampão viscoso foi necessária a utilização da geometria de Couette, pois ela é mais recomendada para se obter medidas mais precisas em altas taxas de deformação.

As geometrias raturadas foram escolhidas para evitar que houvesse deslizamento do fluido na superfície da geometria e também devido à possibilidade de que em baixas taxas de cisalhamento, houvesse migração das moléculas de carbopol da superfície do metal das placas para o centro, formando uma fina camada de água entre a superfície e o centro que ocasionaria o comprometimento das medidas tomadas durante o experimento.

Análise dos Resultados

Alguns dos resultados encontrados após a completa caracterização desses fluidos serão mostrados e discutidos abaixo. É importante evidenciar que todos os testes foram realizados mais de uma vez para que fossem obtidos valores mais exatos dos mesmos.

Análise do Carbopol

O carbopol caracterizado estava presente na concentração de 0,1 % em água.

- Curva de escoamento
-

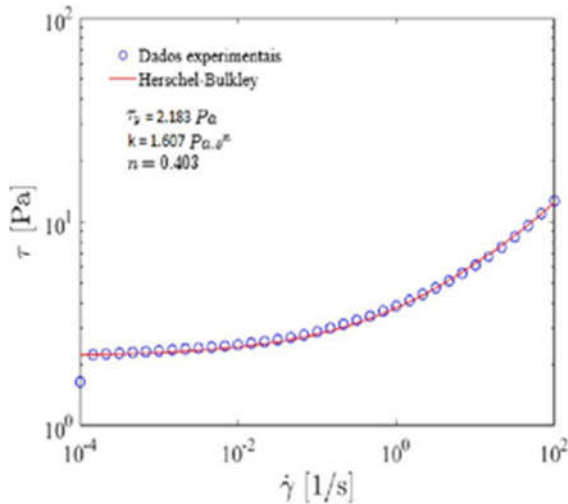


Figura 6: Curva de escoamento do carbopol 0,1 % base água (Tensão versus deformação)

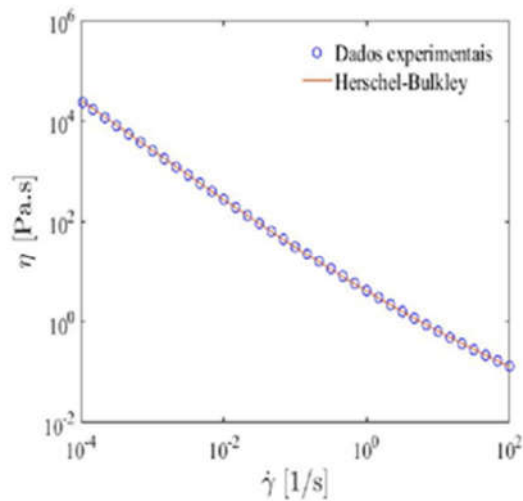
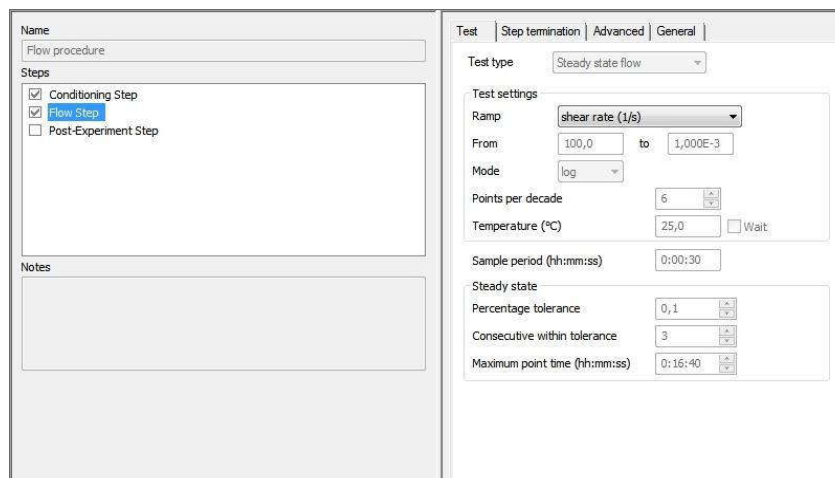


Figura 7: Curva de escoamento do carbopol 0,1 % base água (Viscosidade versus deformação)

Na figura 6, é possível confirmar a escolha do modelo de Hershey-Buckley, pois o fluido estudado apresenta tensão limite de escoamento. O valor dessa tensão encontrado mediante o curve-fitting foi correspondente a 2,183 Pa. Além disso, a tensão do fluido diminui à medida que a taxa de cisalhamento também diminui e o fato de possuir tensão limite de escoamento condiz com a teoria de que o carbopol é um fluido viscoplástico.

Na figura 7, onde foram plotados os valores de viscosidade medidos pelo reômetro em função da taxa de cisalhamento, percebe-se que a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento.



- Varredura de tensão e Varredura no tempo

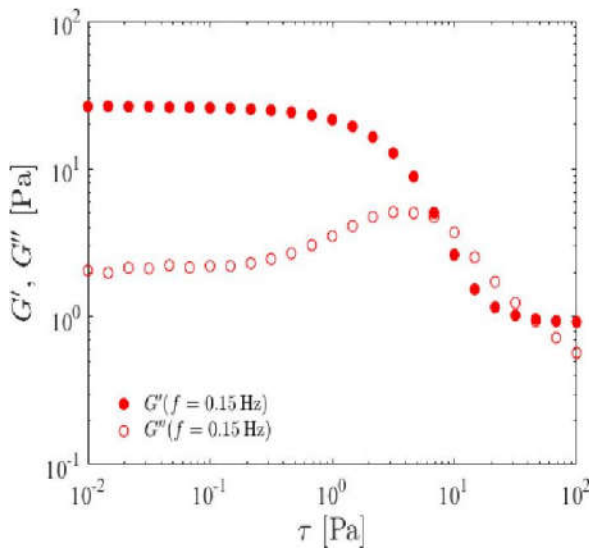


Figura 8: Varredura de tensão do tampão viscoso
tampão viscoso.

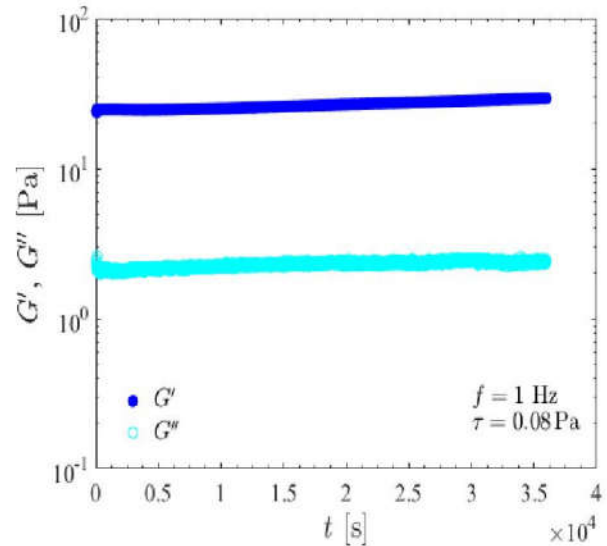


Figura 9: Varredura no tempo do tampão

Na figura 8, foi plotado o módulo elástico (G') e o módulo viscoso (G'') em função do tempo na frequência de 1 Hertz. Foi possível identificar a região viscoelástica linear onde esses dois módulos são paralelos, que termina próximo a tensão de 0,5 Pa. Além disso, o valor de G' no início era maior que o valor de G'' e a partir disso, infere-se que, inicialmente, há predomínio dos efeitos elásticos. Próximo ao valor de 8 Pa, ocorre o cruzamento das curvas e o predomínio das forças viscosas sobre as forças elásticas. Este ponto de cruzamento ocorre em torno da tensão limite de escoamento, i.e., seria a faixa de tensão onde ocorre a quebra da estrutura do fluido e ele começa a escoar.

Na figura 9 foi imposta uma tensão dentro da região viscoelástica linear e foi comprovada a confiabilidade dos testes no tempo de aproximadamente 40000 s e que não houve evaporação ou sedimentação, visto que os módulos elásticos e viscosos se mantêm constantes e paralelos no decorrer do tempo.

- Tensão constante

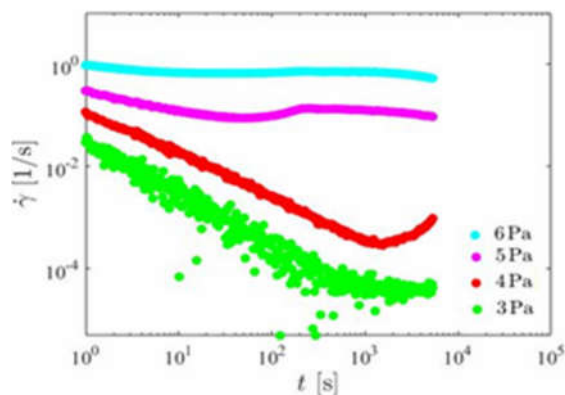


Figura 10: Tensão constante (taxa de deformação versus tempo)

Todos os testes de tensão constante do carbopol foram realizados no período de 1,5 horas. Observa-se a partir do gráfico 5 as curvas plotadas de taxa de deformação versus tempo, em diferentes tensões. Na curva onde foi aplicada a tensão de 3 Pa é possível notar facilmente que não houve qualquer indicio de escoamento nesse tempo, visto que a curva tende para valores muito baixos de deformação. Na curva cuja tensão aplica foi de 4 Pa, no início parece que não ocorrerá escoamento já que a curva apresenta queda inicial a medida que o tempo passa, porém em determinado instante a taxa aumenta indicando que em um tempo maior poderia haver escoamento nessa tensão. Na curva de 5 Pa, inicialmente há uma queda da taxa de deformação e logo em seguida o valor fica constante, demonstrando haver uma mudança na microestrutura ao longo do tempo. Na última curva, de 6 Pa a taxa de deformação é sempre constante com o tempo o que indica que ocorre escoamento do fluido.

Pelo teste de tensão constante, é possível precisar o valor de tensão limite determinado anteriormente através da curva de escoamento já que o fluido não se encontra previamente cisalhado como ocorre nela. É possível notar que a tensão limite de escoamento apresenta valor próximo a 4 Pa. Para melhorar essa precisão seria necessário efetuar um novo teste aplicando uma tensão um pouco menor e observar se há escoamento ou não. Também é possível visualizar que nas curvas cuja tensão aplicada encontra-se próxima à tensão

limite de escoamento, o fluido apresenta tixotropia, pois no início do teste parece que ele vai ter um determinado comportamento que se modifica à medida que o tempo avança.

- Degrau de tensão

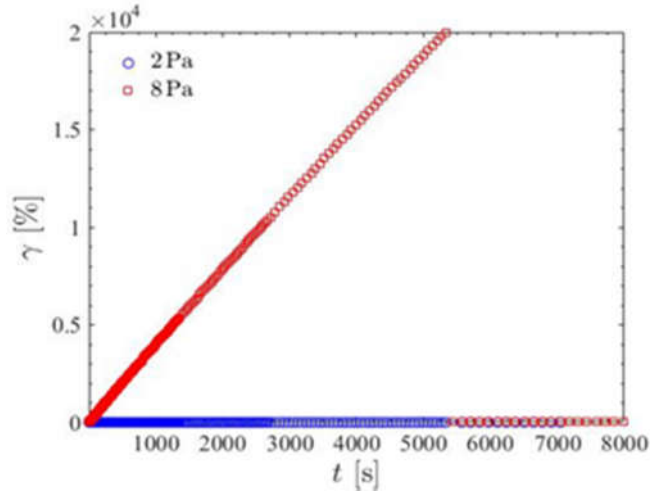


Figura 11: Degrau de tensão (deformação versus tempo)

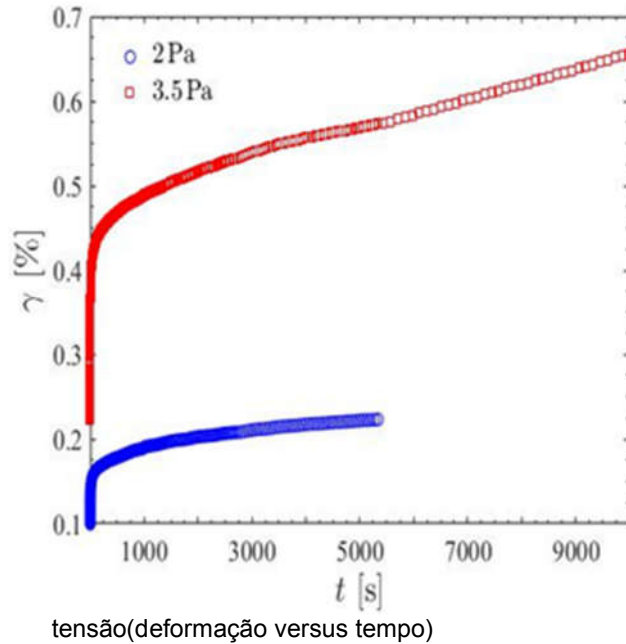


Figura 12:
Degrau de

tensão(deformação versus tempo)

Nas figuras 11 e 12 foram plotados os valores da deformação ao longo

do tempo para duas tensões. Foi avaliado o efeito na deformação de um fluido pré-cisalhado. Na figura 11, percebe-se que quando a tensão imposta é equivalente a 2 Pa, não há escoamento do fluido, pois os valores de deformação são bem baixos. Em seguida, quando a tensão aplicada é aumentada para o valor de 8 Pa, imediatamente a deformação aumenta, ocorrendo então escoamento do fluido bem acima da tensão limite de escoamento, visto que o aumento se dá de forma linear e instantânea. Além disso, esse aumento linear mostra a predominância dos efeitos viscosos em relação aos efeitos elásticos.

Na figura 12, o comportamento da deformação inicia-se da mesma forma que na figura 11, primeiramente impõe-se uma tensão de 2 Pa e percebe-se que o valor da deformação é baixo, ou seja, não há escoamento. Em seguida, essa tensão é aumentada para um valor próximo a tensão limite de cisalhamento, equivalente a 3,5 Pa e logo avalia-se que há também um aumento da deformação, que indica o início de um escoamento. Diferentemente do gráfico anterior, inicialmente esse aumento não apresenta caráter linear, esse fato indica que pode haver tixotropia nessa região e presença de forças viscoelásticas.

Análise do Tampão Viscoso

- Definição da folga

As análises do tampão viscoso são realizadas abaixo mediante a observação dos gráficos gerados a partir dos testes realizados, junto com a investigação da folga a ser utilizada.

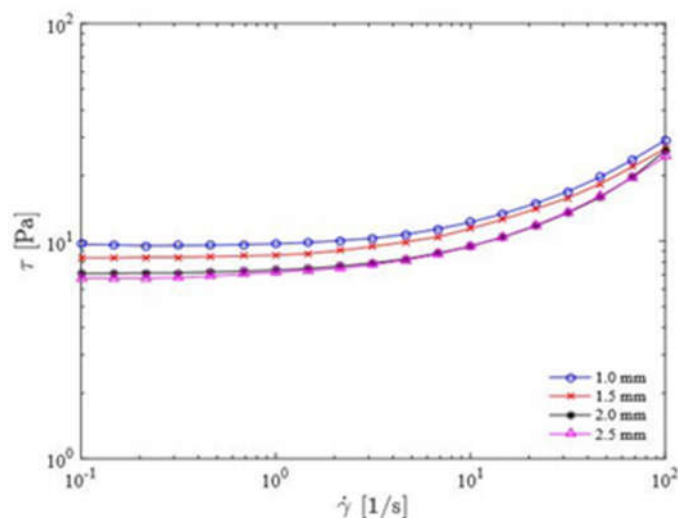


Figura 13: Curvas de escoamento do tampão viscoso com diferentes folgas

Mediante a análise da figura 13, foi possível determinar a melhor folga para se trabalhar na sequência dos testes, de modo a se obter resultados mais precisos com menos gasto de fluido. As curvas com “gap” 2,5 mm e 2,0 mm se sobrepuseram, evidenciando assim que a folga que deve ser utilizada para que o tamanho das partículas do fluido seja de uma ordem de grandeza menor que a folga, deve ser de 2,0 mm.

- Curva de escoamento

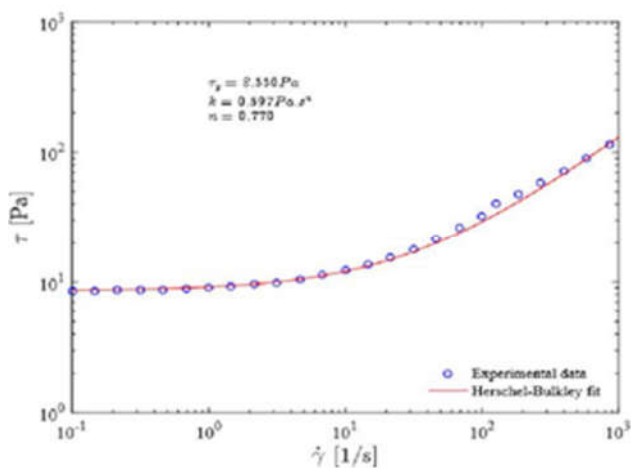


Figura 14: Curva de escoamento do tampão viscoso (Tensão versus deformação)

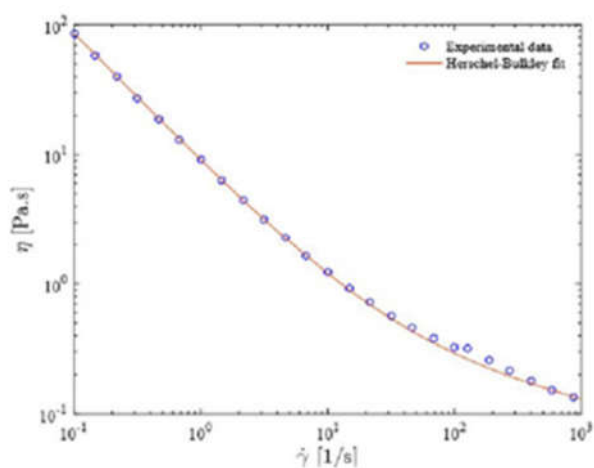


Figura 15: Curva de escoamento do tampão viscoso (Viscosidade versus deformação)

A partir da análise da figura 14, pode-se afirmar que o tampão viscoso apresenta comportamento viscoplástico com tensão limite de escoamento. O modelo de Herschel-Bulkley foi adequado para realizar um curve-fitting da curva e determinar o valor da tensão limite de escoamento, que foi equivalente a 8,550 Pa. Pela figura 15, infere-se que a viscosidade decai à medida que a taxa de deformação é aumentada.

- Varredura de tensão e Varredura no tempo

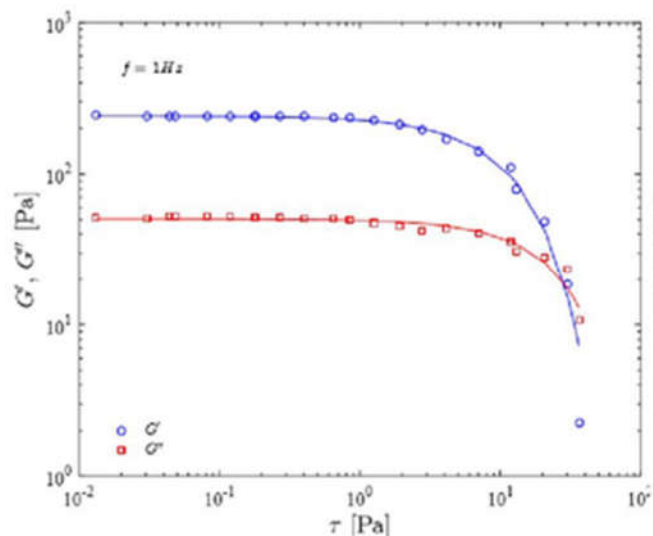


Figura 16: Varredura de tensão do tampão viscoso.

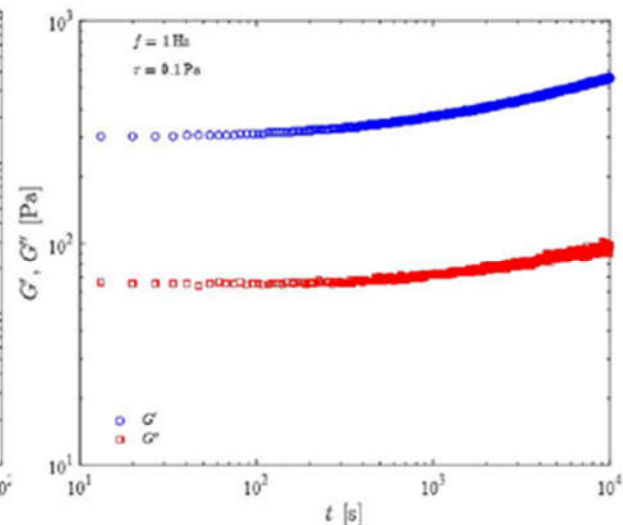


Figura 17: Varredura no tempo do Tampão Viscoso.

Na figura 16 foi imposta uma frequência de 1 Hertz e avaliados os valores do módulo viscoso e elástico. Como o G' possui um módulo maior que o G'' , há predomínio dos efeitos elásticos. Além disso, é possível determinar a região viscoelástica linear, que se encontra dentro da faixa em que os módulos são constantes e paralelos com o tempo. Ao final dessa região, quando ocorre o cruzamento das curvas, o valor de G'' ultrapassa o valor de G' , ou seja, o módulo viscoso torna-se maior que o módulo elástico, indicando o início do escoamento do fluido. A região viscoelástica linear ocorre até aproximadamente 7 Pa.

Na figura 17 foi imposta uma tensão dentro da região viscoelástica linear, determinada pelo gráfico 11 e uma frequência de 1 Hz. Avaliou-se o comportamento dos módulos elástico e viscoso com o tempo. A partir desse gráfico, foi possível verificar que até o tempo de 10000 segundos há confiabilidade dos testes e que não houve sedimentação e evaporação da amostra, pois o valor dos módulos se mantém constantes no tempo de teste.

- Tensão constante

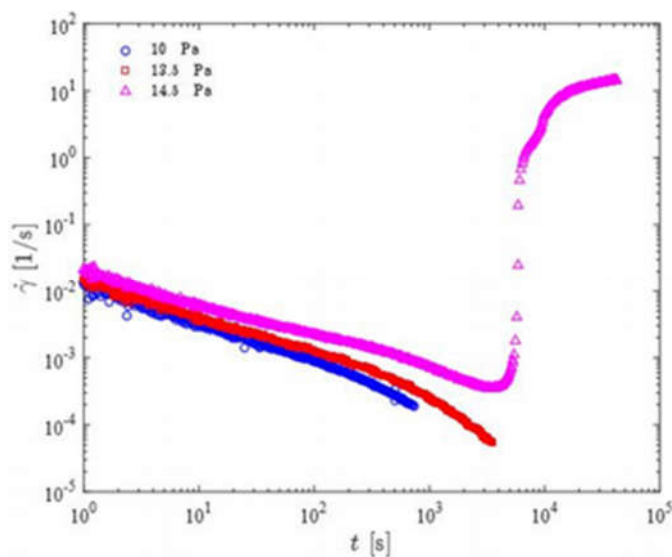


Figura 18: Tensão constante (Tensão versus tempo)

Nas duas primeiras curvas da figura 18 ($\tau = 10$ Pa e $\tau = 13,5$ Pa), é possível notar que no tempo de 1,5 horas não houve escoamento da amostra, visto que o valor da taxa de cisalhamento estava tendendo para valores próximos a zero. A resposta da microestrutura a tensão aplicada não é instantânea, o que caracteriza a presença de tixotropia na amostra nos valores de tensão aplicados. Esse efeito tixotrópico pode ser notado também a partir da análise da terceira curva ($\tau = 14,5$ Pa), onde a amostra inicia com uma tendência de que não irá escoar, porém, após um longo tempo de espera (aproximadamente 10000 s) a viscosidade decresce abruptamente e o fluido escoar (efeito avalanche).

Esse teste é extremamente necessário para que se tenha o resultado da tensão limite de escoamento de um fluido que não foi pré-cisalhado e a sua variação em razão dos diferentes tempos que será imposto. A partir da realização desse teste com a imposição de diferentes tensões, pode ser possível otimizar processos industriais a partir de um corte na curva no tempo de operação do processo de interesse.

Análise comparativa entre Carbopol base água e Carbopol base glicerina

A concentração de pó de carbopol utilizado para base glicerina foi equivalente a 0,125 %.

- Curva de escoamento

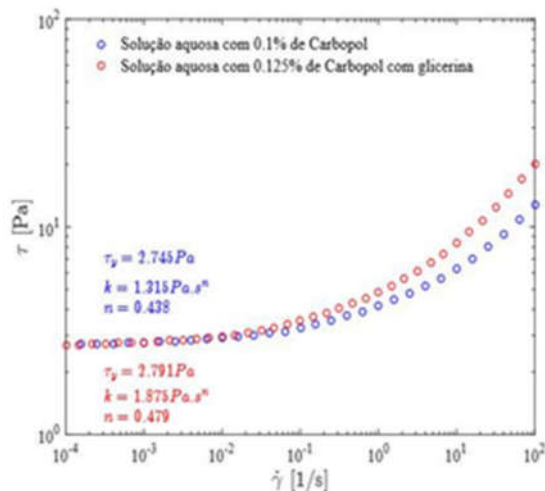


Figura 19: Curva de escoamento do Carbopol base água (0,1 %) e Carbopol base glicerina (0,125 %)

A partir da análise da figura 19, é possível perceber que a solução com glicerina necessita de uma maior quantidade de pó de carbopol em comparação com a solução puramente aquosa, para que ambas atinjam a mesma tensão limite de escoamento.

Também foi observado nos testes de curva de escoamento para esses dois fluidos, que para o carbopol com glicerina, o tempo para que fosse alcançado o regime permanente foi relativamente maior que o do carbopol base água. Esse fato pode ser explicado pelas ligações intermoleculares que se formam entre o solvente e o polímero ocasionando o emaranhamento das cadeias poliméricas.

Conclusão

A análise completa do carbopol e do tampão viscoso foi realizada mediante a utilização do reômetro rotacional e foram encontrados diversos resultados interessantes nesse projeto. O carbopol analisado na concentração de 0,1 % base água possui uma tensão limite de escoamento que foi determinada a partir do curve-fitting, pelo modelo de Hershey-buckley, equivalente a 2,183 Pa. A escolha desse modelo matemático foi bem adequada, visto que a curva obteve uma boa abrangência dos pontos gerados no experimento. A partir do teste de tensão constante, foi possível perceber que a tensão limite encontra-se próxima ao valor obtido pela curva de escoamento na qual o fluido está pré-cisalhado, já que as medidas realizadas pelo reômetro iniciam-se da maior taxa de cisalhamento para a menor, equivalente a aproximadamente 3,5 Pa.

A região viscoelástica linear obtida para o carbopol, a partir do teste de varredura de tensão termina próxima ao valor de 0,5 Pa. O cruzamento das curvas, que indica a inversão do predomínio dos efeitos elásticos em relação aos viscosos, ocorre próximo ao valor de 8 Pa. Mediante a análise do gráfico de varredura no tempo, foi possível obter confiabilidade dos valores no tempo de 35000 segundos e que não houve sedimentação e evaporação da amostra.

A partir da análise dos testes de degrau de tensão, houve a confirmação da presença de tixotropia e efeitos viscoelásticos na tensão próxima a tensão limite de escoamento mediante a análise da curva cuja tensão aplicada foi de 3.5 Pa. Em contrapartida, para a tensão aplicada correspondente a 8 Pa, a curva apresenta crescimento linear evidenciando predomínio dos efeitos viscosos em relação aos efeitos elásticos e presença de escoamento.

No caso do tampão viscoso, o valor obtido pela curva de escoamento, da tensão limite foi equivalente a 8,550 Pa. No teste de varredura de tensão foi possível conhecer a região viscoelástica linear que termina próxima ao valor de 7 Pa. A confiabilidade dos testes foi confirmada pela varredura no tempo, onde não houve sedimentação e evaporação da amostra até 10000 segundos. No teste de tensão constante observou-se o efeito avalanche, no qual a amostra parecia que não iria apresentar escoamento, quando entre 1000 e 10000

segundos ela escoou subitamente devido à queda brusca da viscosidade do fluido.

Mediante uma breve comparação entre o carbopol em solução somente com água e o carbopol em solução com glicerina foi possível notar que é necessária uma maior quantidade do polímero carbopol, no segundo caso, para que seja atingido o mesmo valor de tensão limite de escoamento. Ademais, também se verificou que o tempo para que fosse alcançado o regime permanente no fluido com glicerina foi maior que o do carbopol a base somente de água.

Por meio da análise completa dos fluidos, foi permitido validar o comportamento viscoplástico dos fluidos e também a presença de tixotropia nas regiões próximas a tensão limite de escoamento. Os dois fluidos completamente caracterizados no presente projeto possuem propriedades que lhes permitem serem utilizados em diferentes aplicações, como é o caso do tampão viscoso que já se encontra em uso nas plataformas de petróleo. O estudo dessas propriedades reológicas é fundamental para que se alcancem, crescentemente, maiores avanços tecnológicos nos diversos segmentos industriais e com isso, se tenha maiores economias de tempo e dinheiro. Também é importante o estudo comparativo entre os fluidos de carbopol com diferentes solventes para que se ampliem as pesquisas relativas a esses assuntos.

Referências

Barnes H.A. **Handbook of elementary rheology** (U. Wales, 2000) (ISBN 0953803201)

Priscilla Ribeiro Vargas. **Posicionamento de tampões em poços de petróleo: uma investigação de escoamentos de inversão por gravidade**. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação para obtenção de Título de Doutorado em Engenharia mecânica- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/371659/mod_resource/content/1/REOLOGIA%20E%20FLUIDOS%20-%20apostila.pdf – Acesso em: 17/07/2017