

# *Monografia de Graduação*

## **ANÁLISE E MODELAGEM REOLÓGICA DA INTERAÇÃO DE SISTEMAS POLIMÉRICOS**

**Bárbara Borges Rosales**

**Natal, fevereiro de 2014**

**Bárbara Borges Rosales**

**ANÁLISE E MODELAGEM REOLÓGICA DA INTERAÇÃO DE SISTEMAS  
POLIMÉRICOS**

Monografia de Graduação

**Orientador (a):** Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Tereza Neuma de Castro Dantas

**Co-orientador:** Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto

Natal/RN

Fevereiro /2014

**ROSALES, Barbara Borges** – Análise e modelagem reológica da interação de sistemas poliméricos. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

**Orientador (a):** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tereza Neuma de Castro Dantas

**Co-orientador:** Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto

**Resumo:** A poliacrilamida é um polímero que quando adicionado à solução aumenta a viscosidade para que haja a suspensão de sólidos gerados na perfuração quando a circulação do fluido for colocada em repouso, mas também não apresenta uma resistência ao escoamento tão alta para colocar o fluido em movimento novamente. Uma análise do comportamento reológico e de sua modelagem matemática foi feita para soluções poliméricas a fim de se verificar suas interações. Foi feita a interpretação dos dados gerados pelas curvas de fluxo e de viscosidade. A determinação do modelo reológico que melhor representou as soluções contendo as poliacrilamidas aniônicas da família SH foi o modelo de Bingham, apesar do que é encontrado na literatura para os sistemas em estudo. Observou-se também que em baixas concentrações as poliacrilamidas, que já são utilizadas como excelentes flocculantes, comprovam experimentalmente uma relevante influência quanto ao desempenho reológico. O comportamento pseudoplástico pode ser observado tanto nos gráficos de tensão de cisalhamento como viscosidade, ambos em função da taxa de cisalhamento.

**Palavras chaves:** *aditivos poliméricos, poliacrilamidas e reologia.*

## ABSTRACT

Polyacrylamide is a polymer that when it is added to the solution, the viscosity increases to suspend the solids generated in the drilling process whenever the circulation of fluids is stopped, but it also does not present a high resistance when the fluid is returned to flux. Analysis and mathematical modeling of the rheological behavior are completed on polymeric solutions in order to assess its interactions. An interpretation of data generated by flux and viscosity curves is included. It is determined that the best rheological model for fluids composed of anionic polyacrylamides from the SH family is the Bingham model, despite what is found in the literature for this kind of solution. This study shows that in low concentrations of the polymer, polyacrylamides – which are already excellent flocculants – are proven to influence the rheological performance of drilling fluids, and its formulations achieve the functionality required for the fluid. The pseudoplastic behavior can be observed on graphs for shear force or viscosity in function of the shear rate.

**Keywords:** *polymeric additives, polyacrylamides, and rheology.*

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>9</b>
3.1.1	Polímeros .....	9
3.1.1.1	Amido .....	11
3.1.1.2	Goma Xantana (GX).....	12
3.1.1.3	Carboximetilcelulose de sódio (CMC).....	13
3.1.1.4	Polímeros sintéticos .....	14
3.2	<b>Reologia</b> .....	<b>17</b>
3.2.1	Modelo de Bingham ou plástico ideal .....	22
3.2.2	Modelo de Ostwald de Waale ou Fluido de Potência .....	23
3.2.3	Modelo de Herschell-Buckley.....	24
<b>4</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>31</b>
5.1	<b>Materiais</b> .....	<b>31</b>
5.1.1	Aditivos .....	31
5.1.2	Equipamentos .....	33
5.2	<b>Preparação das soluções</b> .....	<b>34</b>
5.3	<b>Ensaio Reológicos</b> .....	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>40</b>
6.1	<b>Estudo reológico dos polímeros AN SH</b> .....	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>52</b>

---

CAPÍTULO 1  
INTRODUÇÃO

---

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de perfuração de poços é uma das etapas de extração de petróleo e esse processo se dá pela ação de uma sonda de perfuração rotativa que contém uma coluna de perfuração que aplica peso e rotação a uma broca existente em sua extremidade, gerando pedaços de rochas chamados de cascalhos, que são removidos continuamente do interior do poço pelo fluido de perfuração. Sólidos e gases que se incorporam ao fluido durante a perfuração são retirados e, quando se faz necessário, produtos químicos são adicionados para ajustar algumas propriedades. (PETROBRAS, 1991)

Desde a origem da indústria dos fluidos de perfuração até seus primeiros 50 anos o número de produtos a serem usados como aditivos cresceu de, aproximadamente, uma dúzia de produtos para mais de 1400 aditivos patenteados, segundo Darley & Gray, 1988. Pesquisas são desenvolvidas continuamente para melhorar a atuação dos fluidos de perfuração, e os aditivos são estudados individualmente para afetar uma ou mais propriedades que são medidas de acordo com os padrões de procedimentos do Instituto Americano de Petróleo, API. (CAENN e CHILLINGAR, 1996).

Com a ocorrência pela primeira vez em 1921, os aditivos utilizados serviam para a simples função de controlar a consistência dos fluidos de base aquosa, fazendo com que ficassem mais encorpados ou mais finos de acordo com a necessidade. Os aditivos atuais, por outro lado, são usados para atuar em uma ou até em várias das 16 funções de separação em dez diferentes sistemas de fluido de perfuração. (DARLEY & GRAY, 1988)

Alguns materiais utilizados como adesantes, como os polímeros, alteram o perfil reológico do fluido e o reconhecimento de que os polímeros podem fazer fluidos muito melhores que os que vêm sendo feitos até agora, apesar de serem caros, foi de grande impacto na indústria dos fluidos de perfuração. (DRILLING FLUIDS PROCESSING HANDBOOK, 2005).

Araújo et al., 2005, definem o quão importante são os polímeros no mercado da indústria de perfuração pelas suas distintas propriedades reológicas pela capacidade que ele tem de criar um aumento na viscosidade e na pseudoplasticidade do fluido com baixas concentrações do componente.

Baseado nessas informações, esse trabalho visa analisar a influência de uma família de poli(acrilamidas aniônicas) na reologia de fluidos de perfuração, cujos resultados poderão trazer grandes benefícios para a indústria do petróleo.

---

CAPÍTULO 2

OBJETIVO

---

## **2 OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar reologicamente uma família de poliacrilamidas e verificar como eles podem alterar o comportamento reológico das soluções em baixas concentrações.

---

CAPÍTULO 3  
REVISÃO  
BIBLIOGRÁFICA

---

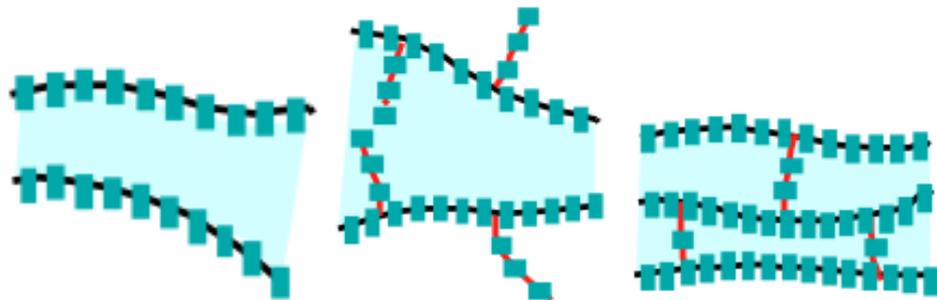
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1.1 Polímeros

Muitos aditivos dos fluidos de perfuração são chamados de polímeros, mas o conceito definido por Brau et al., 2004, diz que os polímeros, também conhecidos como macromoléculas, são componentes de alto peso molecular, acima de 200, e de longas cadeias. São formados por unidades repetidas, mais de oito, chamadas de monômeros. Esses monômeros podem ser de uma mesma molécula, de duas ou de mais moléculas diferentes combinadas para formar os copolímeros.

Estruturalmente falando, os polímeros podem ser lineares ou ramificados. E devido ao fato de combinar dois ou mais monômeros, ainda é possível que várias outras estruturas poliméricas sejam formadas, como apresentado a seguir na Figura 2.1, variando bastante suas funções e propriedades básicas, como estabilidade e carga. (CAENN e CHILLINGAR, 1996).

Figura 2.1. Estruturas moleculares de polímeros lineares, ramificados e reticulados.



Devido a sua alta massa molar, os polímeros apresentam propriedades particulares que não são observadas em nenhuma outra classe de materiais. Como exemplo, pode-se citar que eles possuem excelentes propriedades mecânicas. A termoplasticidade, também característica dos polímeros, permite aos polímeros modelamento e orientação das cadeias moleculares resultando em uma extraordinária força elástica. (BRAU et al., 2004)

A natureza desenvolveu essas macromoléculas para diferentes propósitos, porém com o desenvolvimento da tecnologia e após vários estudos sobre a composição, estrutura e propriedades dos polímeros e sua química, essas macromoléculas foram implementadas e produzidas sinteticamente em todo o mundo. Trata-se de um processamento de baixo peso e baixo custo que é realizado até nos dias de hoje.

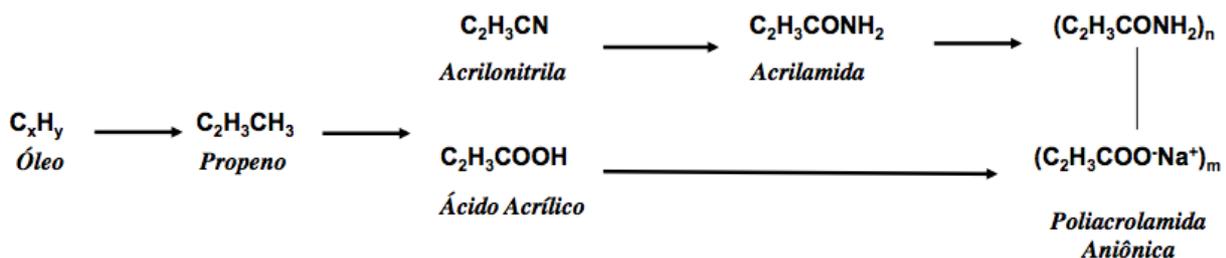
Brau et al., 2004, classifica essas macromoléculas de acordo com sua composição, podendo ser orgânica, inorgânica ou organometálica. Os polímeros inorgânicos não contêm nenhum carbono. Os polímeros organometálicos só possuem átomos de metais e átomos de carbono nas suas cadeias laterais. Os orgânicos, por sua vez, podem conter em suas moléculas átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, potássio e halogênios.

Devido à sua grande diversidade na composição e propriedades que os polímeros orgânicos oferecem para seu uso em fluidos de perfuração, se faz necessária uma análise crítica dos fatores que envolvem a seleção do produto para a sua aplicação específica, apresentam Darley e Gray, 1988.

Entre os fatores que afetam o desempenho do fluido após a adição de polímero, estão os efeitos das condições de cisalhamento, temperatura, sais dissolvidos e materiais alcalinos, microrganismos e o tempo de uso do polímero. Por exemplo, se a aplicação do fluido aditivado toma lugar na fase de completação, tanto a solubilidade do polímero em ácidos como a possibilidade de um efeito de tamponamento do polímero na formação produtora devem ser levadas em consideração, assim como outros fatores de igual importância como a facilidade de manuseio e mistura, possível impacto ao meio ambiente e custo do polímero.

Os polímeros orgânicos são utilizados nos fluidos de perfuração e devem ser classificados quanto à sua origem e composição. Alguns são como o amido, originados naturalmente e podem ser utilizados após simples tratamento, porém, outros, como a goma xantana, são submetidos a processos naturais em sua produção. Ainda existem os polímeros que são derivados do amido e da goma xantana que são os chamados semissintéticos. E outra classe de polímeros são os derivados de produtos petroquímicos, esses são os poliacrilatos e o óxido de etileno, por exemplo, que são puramente sintéticos que podem ser representados pela Figura 2.2 a seguir representando esquematicamente a reação química de produção de poliacrolamida aniônica.

Figura 2.2. Reação de produção de um polímero puramente sintético, a poliacrilamida, através de derivado de petróleo.



Fonte: Material informativo SNF FLOERGER, 2006.

Os materiais coloidais orgânicos são utilizados nos fluidos de perfuração com as funções de diminuir a filtração, estabilizar argilas, flocular cascalhos, aumentar a capacidade de carreamento e servir como emulsificantes e lubrificantes. Com a adição desses materiais ao fluido, uma notável melhora pode ser percebida na atuação do mesmo. (DARLEY & GRAY, 1988)

As propriedades coloidais dos polímeros orgânicos afetam significativamente o papel desses componentes nos fluidos. E esses polímeros utilizados nos fluidos de perfuração tem uma forte afinidade com a água, tanto que em baixas concentrações eles desenvolvem um consistente gel. Outra importante característica é que alguns podem até mesmo serem absorvidos por partículas de argila, oferecendo uma proteção contra a floculação feita por sais. (DARLEY & GRAY, 1988)

Apesar desses polímeros não se dilatarem em água salgada como acontece em água doce, eles ainda assim providenciam partículas viscosas de tamanhos grandes que auxiliam na resistência à penetração de água através da camada filtrante. (DARLEY & GRAY, 1988)

### **3.1.1.1 Amido**

O amido foi o primeiro polímero a ser usado em considerável quantidade nos fluidos de perfuração. Foi inicialmente utilizado em fluidos preparados com água salgada para o controle da filtração. Seu uso rapidamente se expandiu para outras áreas e aplicações uma vez que havia problemas com o fluido relacionados à filtração. (DARLEY & GRAY, 1988)

O uso do amido, porém foi pouco a pouco sendo substituído por outros polímeros à medida que estes foram introduzidos à indústria de fluidos, como a carboximetilcelulose de sódio (CMC). Além disso, fluidos com alto valores de pH foram também substituídos por outros tipos de fluido, que nesse caso se fez necessário o uso de biocidas para tentar prevenir a fermentação do amido no fluido, já que não havia a alta alcalinidade que impedia isso como anteriormente. (DARLEY & GRAY, 1988)

Porém ele continua sendo a substância mais economicamente viável que reduz a taxa de filtração dos fluidos fortemente alcalinos e saturados de sal para o estágio inicial da perfuração.

Este polímero é o principal componente das sementes dos cereais, como milho, trigo e arroz, sendo o milho a principal fonte do amido utilizado em fluidos de perfuração. Trata-se de um grupo de carboidratos que quando granulado, é separado e deve ser gelificado

previamente para que possa ser mais facilmente dispersado em água. (DRILLING FLUIDS PROCESSING HANDBOOK, 2005).

Caenn e Chillingar, 1996, explicam que o amido pode ser disponível na forma não iônica ou levemente aniônica. É usado como agente de controle de perda de circulação para todos os tipos de sistemas de fluidos e são mais vistos adicionados aos fluidos de água salgada.

O amido utilizado nos fluidos de perfuração também serve para reduzir a filtração devido às suas grandes moléculas (HPA), segundo Machado & Oliveira, 1986. Ele está muito vulnerável à fermentação por vários microrganismos e a menos que o fluido esteja saturado com sal ou possuir pH por volta de 12, é necessário utilizar substâncias que impeçam a fermentação do componente e impeçam assim que ele se degrade rapidamente, caso o fluido seja destinado ao uso por vários dias.

Essa substância é degradada por calor e agitação. Com uma circulação no poço por volta de 93°C ou mais, o amido se quebra rapidamente. O produto resultante perde a capacidade de selagem na camada filtrante que o amido possuía. Conseqüentemente, a taxa de filtração e a espessura da camada filtrante aumentam sob as condições estáticas do fundo do poço. (DARLEY & GRAY, 1988)

### **3.1.1.2 Goma Xantana (GX)**

A goma xantana é classificada como um polímero natural, mas ultimamente ela vem sendo produzida ao invés de ser obtida na sua forma natural. Este componente é um polissacarídeo solúvel em água e produzido pela ação das bactérias nos carboidratos. (DARLEY & GRAY, 1988)

As soluções de goma xantana apresentam excelentes propriedades de cisalhamento, característica de alta relevância quando o assunto é fluido de perfuração. Trata-se de um material que modifica a reologia do fluido, agregando viscosidade em soluções aquosas ou salinas, apesar de que às vezes seja necessário acrescentar uma maior quantidade da substância para se atingir a mesma viscosidade em soluções saturadas com sal. (DARLEY & GRAY, 1988).

A maior aplicabilidade da goma xantana nos fluidos de perfuração é como adesante, ou melhor, como agente de suspensão. Foi concluído que a habilidade de suspensão da solução polimérica está diretamente relacionada com a viscosidade da solução à baixa taxa de

cisalhamento. Essa capacidade supera o efeito de suspensão de qualquer outro polímero atualmente utilizado nos fluidos de perfuração, apresentando isso, a goma xantana em baixas concentrações favorece seu uso mesmo que o custo de transporte esteja alto. (ARAÚJO et al., 2005)

Apesar de não ser um agente controlador de filtração, é compatível com as substâncias que ajudam a reduzir a filtração, por exemplo, a bentonita e o CMC. (DARLEY & GRAY, 1988)

Caenn e Chillingar, 1996, explicam que foi estipulada uma concentração crítica de polímeros que devem estar presente no fluido para que haja uma adequada capacidade de carreamento e de suspensão de cascalho em poços horizontais. Essa concentração depende da temperatura, da presença de outros sólidos e da salinidade do sistema, uma quantidade varia na faixa de 1,25 a 1,5 lb/bbl.

### ***3.1.1.3 Carboximetilcelulose de sódio (CMC)***

Uns dos polímeros mais utilizados são os semissintéticos produzidos através da modificação química da celulose. Dos derivados da celulose, o carboximetilcelulose de sódio, CMC, foi o primeiro a ser usado nos fluidos de perfuração. Suas principais funções são a de aumentar a viscosidade do fluido e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de carreamento de cascalho. (CAENN E CHILLINGAR, 1996).

O CMC é um composto que se dispersa em água, incolor, inodoro, não-tóxico e podendo ser encontrado em vários graus de pureza. Por não fermentar em condições normais de uso, é preferível ao amido para aplicações que não sejam em altas faixas de pH ou em fluidos saturados com sal. Por outro lado é relativamente mais caro que o amido, mas uma pequena quantidade do componente já é o suficiente para reduzir a filtração e a espessura da camada de filtração. Essa eficiência em reduzir a filtração e aumentar a viscosidade diminui à medida que a concentração de sais aumenta. (DARLEY & GRAY, 1988)

Para se produzir CMC, a celulose quimicamente pura deve ser tratada com solução de soda cáustica para formar a celulose alcalina. Adicionando monocloroacetato de sódio ou ácido monocloroacético à celulose alcalina, se alcança então a formação de carboximetilcelulose, CMC.

Caenn e Chillingar, 1996, definem que o CMC é um polímero aniônico com grupos de ácido carboxílico e é absorvido por argilas, por exemplo, a bentonita. Sua função depende do

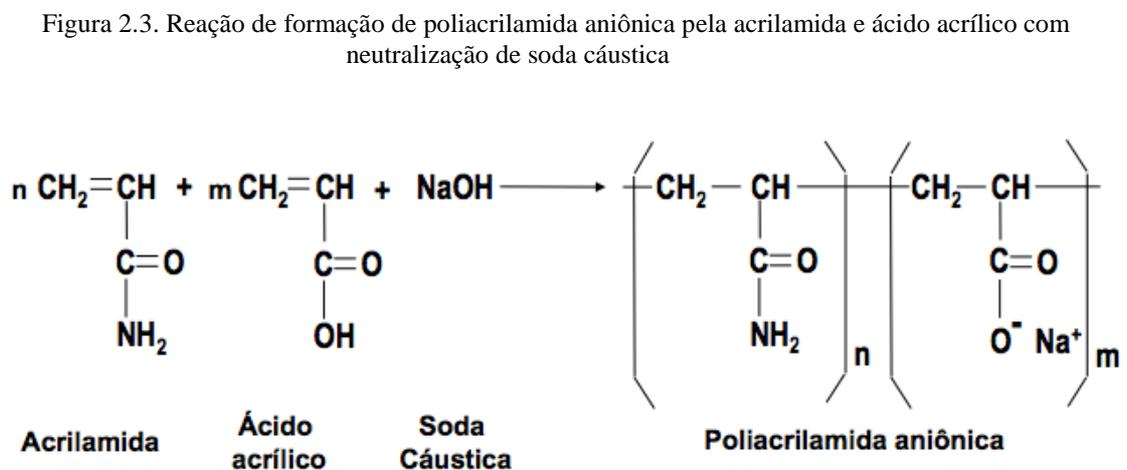
grau de substituição e do seu peso molecular. Quando adicionado ao fluido, a taxa de filtração é reduzida bruscamente apenas com pequenas concentrações de CMC, especialmente pelos produtos de alto peso molecular que acarretam maior viscosidade.

As suspensões de CMC se tornam menos espessas com o cisalhamento. Com baixa taxa de cisalhamento, por outro lado, essas suspensões aparentam ter uma alta viscosidade. Essa aparente viscosidade alta diminui com o aumento da temperatura. (DRILLING FLUIDS PROCESSING HANDBOOK, 2005).

### 3.1.1.4 Polímeros sintéticos

Muitos polímeros sintéticos são feitos através de materiais monoméricos. Uma vasta faixa de composição e propriedades são possíveis de se formar a partir da combinação desses monômeros e muitos são produzidos sinteticamente pela polimerização direta, sendo poucos os que passam pela segunda reação. (DARLEY & GRAY, 1988)

Um exemplo de polímero sintético são os polímeros acrílicos compostos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. A partir desses elementos, inclusive, muitos polímeros solúveis em água podem ser produzidos. A Figura 2.3 apresenta a representação esquemática da reação química para obtenção da poliacrilamida aniônica partindo da acrilonitrila, a acrilamida pode ser formada, então quando polimerizada e depois neutralizada com hidróxido de sódio a poliacrilamida pode ser feita, como ilustrada a reação a seguir. (DARLEY & GRAY, 1988)



Fonte: Material informativo SNF FLOERGER, 2006.

A conversão dos grupos de amido em grupos carboxílicos é chamada de hidrólise. A porcentagem hidrolisada em cada reação, sendo o polímero não iônico, catiônico ou aniônico, e o seu peso molecular são fatores significantes que podem afetar a preservação dos folhelhos. (DARLEY & GRAY, 1988)

O desempenho dos polímeros sintéticos nos fluidos de perfuração é afetado não só pela composição, estrutura ou peso molecular do polímero específico, mas também pela composição e temperatura do sistema ao qual será adicionado. Um dado polímero pode ser floculante em baixas concentrações, e um redutor de perda de água em altas concentrações. Esses fatores variáveis podem fazer com que seja necessário um intenso programa de testes antes de ser lançado um novo produto no mercado da indústria de fluidos de perfuração. (DARLEY & GRAY, 1988)

Em geral, para um único tipo de polímero, a diminuição da taxa de filtração e o aumento da viscosidade e da força gel podem ser calculados proporcionalmente ao aumento do peso molecular, dobrando o valor original dessas variáveis.

Na perfuração de rochas duras com fluidos de perfuração de base aquosa, certa quantidade de polímeros acrílicos se faz necessária pela eficiência que esse componente tem como floculante, além de também auxiliar no espessamento do fluido junto à bentonita que irá melhorar a limpeza do fundo do poço. Os fluidos assim tratados ainda podem ajudar facilitando a separação do cascalho depois de circulado no poço.

O polímero age na redução da perda de atrito quando circulado em escoamento turbulento e isso influenciará de maneira que a taxa de perfuração seja mais rápida, o que reduz significativamente o preço da locação em função da profundidade perfurada.

Polímeros acrílicos, em conjunto com a bentonita nos fluidos de perfuração, possuem uma variedade de aplicações e a sua faixa de concentração varia de muito baixa quando atua como floculante, até muito alta para controle de filtração.

O poliacrilato é um material aniônico produzido sinteticamente de derivados do petróleo. Diferentemente dos polímeros naturais, sua estrutura não é tão complexa. Sua cadeia principal geralmente é linear composta de carbonos e dependendo do produto final desejado, suas cadeias laterais podem variar. (CAENN e CHILLINGAR, 1996).

Caenn e Chillingar, 1996, classificam os poliacrilatos em três grupos diferentes, cada grupo possuindo uma função em particular:

- Poliacrilatos de baixo peso molecular: São utilizados como “afinantes” e “desfloculantes”;

- Poliacrilatos de peso molecular médio: São utilizados como controladores de perda de circulação, floculantes e estabilizadores de folhelhos;
- Poliacrilatos de alto peso molecular: São utilizados como floculantes e “extensões da bentonita”.

A poliacrilamida é um copolímero, também conhecido como poliacrilamidas parcialmente hidrolisadas (PHPA). São geralmente encontradas na sua forma aniônica quando sua finalidade é para o fluido de perfuração, mas podem ser aniônicas, catiônicas ou não-iônicas quando utilizados como floculantes desidratantes ou quando é utilizados em outras aplicações no campo. (CAENN e CHILLINGAR, 1996).

É solúvel em água e por ser tão hidrofílico, às vezes, se torna insensível à adição de sais. É um polímero utilizado como floculante por ter uma alta afinidade às superfícies de natureza catiônica quando aplicados em baixos valores de pH. Este polímero se torna ainda mais funcional quando cadeias laterais hidrofóbicas são adicionadas a ele, pois se cria assim um polímero anfifílico.

Os polímeros catiônicos são também copolímeros combinados de grupos químicos de carga positiva com outros polímeros, por exemplo, a poliacrilamida ou os poliacrilatos. São utilizados como floculantes e adicionados para formular fluidos estabilizadores de folhelhos, de acordo com Caenn e Chillingar, 1996.

### 3.2 Reologia

Reologia é um ramo da física relacionado com a mecânica de corpos deformáveis, a ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria. Ela analisa internamente como que a matéria escoou ou se deforma quando está submetida a esforços gerados por forças externas.

Considerando a matéria como sólida, líquida ou gasosa, a deformação é caracterizada por leis que descrevem mudanças no volume, tamanho ou forma. Já para o escoamento de um fluido, líquido ou gás, as leis descrevem a variação contínua de taxa ou grau de deformação em função às tensões ou forças aplicadas. (MACHADO, 2002)

Annis e Smith (1996) descrevem que os conhecimentos básicos de reologia irão auxiliar na indústria do petróleo em relação à análise do comportamento reológico do fluido empregado na perfuração e também outras etapas como produção e transporte do petróleo. Definindo os parâmetros reológicos, podem-se estimar as perdas de carga, a capacidade de transporte e sustentação de sólidos, além de qualificar e especificar os fluidos.

Os equipamentos utilizados neste tipo de pesquisa devem ser altamente confiáveis e calibrados com a finalidade de obter resultados com alto grau de repetibilidade e reprodutibilidade. Determinar os parâmetros e saber analisar os resultados trará muitos benefícios tecnológicos para a indústria do petróleo.

Os corpos podem se deformar de duas maneiras diferentes, reversível e irreversivelmente. A deformação reversível pode também ser chamada de elasticidade, que corresponde à energia mecânica totalmente recuperável depois de aplicada na deformação de um corpo quando este volta ao seu estado original. Esta deformação é expressa em função da tensão aplicada como trabalho. Por outro lado, a deformação irreversível também é conhecida como fluxo ou escoamento, aonde o trabalho usado para manter o escoamento é perdido na forma de calor. Essa energia mecânica dissipada em forma de calor é chamada viscosidade. (MACHADO, 2002)

Outro importante termo da deformação é o cisalhamento, que indica o deslizamento correspondente às placas planas empilhadas, infinitas e paralelas que podem representar o interior da deformação laminar. Trata-se somente de um estado de mudança de posições relativas às partes componentes do corpo. O conceito de cisalhamento é baseado nas taxas de deformação que significa a variação da velocidade do fluxo em relação a uma distância ortogonal à qual o fluxo se dirige. (MACHADO, 2002)

Quando um esforço é aplicado a um corpo e ele se deforma reversivelmente, ou seja, voltando à forma original e liberando toda energia a qual foi a ele aplicada logo após o alívio,

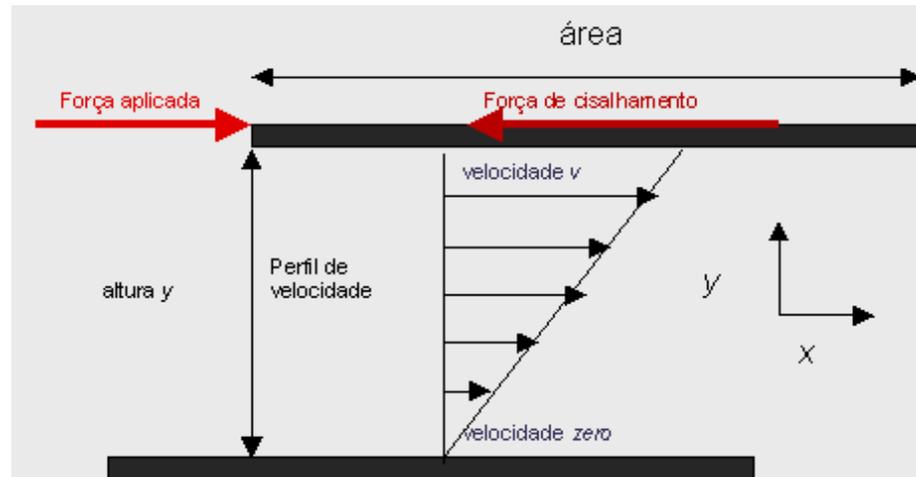
dizemos que esse corpo é idealmente elástico. Essa reação do corpo quanto ao estímulo é chamada deformação elástica, que é uma deformação espontânea e reversível. A razão entre a tensão e a deformação relativa é denominada de módulo de elasticidade. (MACHADO, 2002)

O escoamento é um tipo de deformação aonde fluidos viscosos quando aplicados a um sistema de forças se modificam de forma contínua e irreversivelmente. Para fluidos idealmente viscosos a taxa de deformação é representada matematicamente como uma função da tensão. Esse tipo de fluido não consegue aguentar a tensão aplicada e então alivia na forma de escoamento. Existem fluidos extremamente viscosos que podem apresentar certa força elástica como reação à tensão aplicada, mas após algum tempo ele também alivia essa tensão na forma de escoamento. O que confirma que ele é um fluido viscoso e não elástico é o fato do período que este se mantém em escoamento pleno ser consideravelmente superior ao período ao qual resiste a esse sistema de forças. Essa resistência que certos fluidos apresentam quanto à mudança posicional é chamada viscosidade ou coeficiente de viscosidade. (MACHADO, 2002)

Diferentemente dos corpos elásticos, os fluidos viscosos dissipam a energia aplicada da tensão no seu interior na forma de calor, ou seja, assim que o esforço é aliviado, essa conversão de energia mecânica em calor será perdida e não recuperada como explicado anteriormente. Isso faz com que, durante o período que a tensão é aplicada de forma contínua ao sistema do fluido viscoso, este se mantenha em regime de escoamento. (MACHADO, 2002)

A taxa de cisalhamento, no caso dos fluidos viscosos, expressa a deformação viscosa, que seria a relação entre a variação de velocidade do escoamento e a distância entre as camadas discretas do fluido. Este cisalhamento pode ser ilustrado pela Figura 2.4, no qual duas placas, uma móvel superior e outra fixa inferior, são situadas paralelamente e separadas por uma distância de altura  $y$ , conforme ilustrado. Entre as placas se localiza o fluido viscoso que é provocado a uma variação de velocidade no seu interior por uma força aplicada na placa superior, que irá gerar um regime estacionário laminar. Nota-se que a camada logo acima da placa inferior está parada, com velocidade igual a zero, e que a camada de fluido que encosta na placa superior tem a mesma velocidade que a placa.

Figura 2.4. Representação gráfica do escoamento de um fluido sob tensão cisalhante.



Fonte: [http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cisa\\_figu.htm](http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cisa_figu.htm).

A relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento é o que vai diferenciar um fluido viscoso de um sólido elástico. Podemos identificar ambos de acordo com a sua resposta a um estímulo de força, enquanto o sólido sofre deformação proporcional à tensão aplicada, um fluido sofre escoamento contínuo devido ao cisalhamento entre suas camadas.

Por definição matemática temos que a tensão de cisalhamento,  $\tau$ , é a razão entre a força aplicada ao sistema e a área cisalhada, como representada pela Equação (1), fazendo com que o escoamento do fluido se mantenha constante. Devido à resistência que o escoamento possui no início da operação, se faz necessário mais ou menos força para que haja a variação de posição e conseqüentemente de velocidade, e essa razão pode ser expressa pela equação a seguir:

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

Da qual F representa a força aplicada ao sistema na mesma direção do escoamento e A representa a área da superfície que será cisalhada.

Já a taxa de cisalhamento,  $\gamma$ , pode ser definida matematicamente pela relação entre a diferença das velocidades entre planos vizinhos e a distância entre eles, como representada pela Equação (2). Pois se trata de uma grandeza que explica o deslocamento relativo dos diferentes planos de um fluido. A expressão matemática que representa essa razão é ilustrada a seguir por:

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta S} \quad (2)$$

Na expressão anterior  $\Delta V$  representa a diferença da velocidade entre dois planos vizinhos e  $\Delta S$  representa a distância entre esses dois planos.

A tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de cisalhamento para fluidos viscosos ideais e nesse caso há uma constante de proporcionalidade denominada por  $\mu$ , que por definição é a viscosidade dinâmica do fluido, a qual pode ser expressa pela Equação (3) a seguir:

$$\tau = \mu \left( \frac{\Delta V}{\Delta S} \right) \quad (3)$$

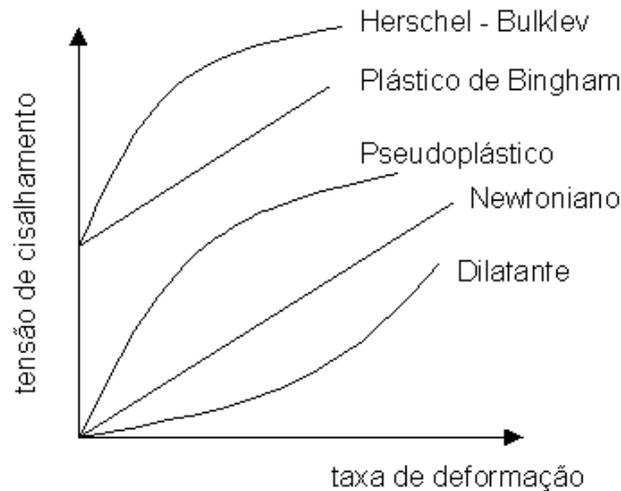
Como visto anteriormente na Equação (2), que  $\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta S}$ , logo a Equação (3) pode ser manipulada para ser representada de tal maneira:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4)$$

A viscosidade dinâmica é propriedade que o fluido tem de resistir à força que nele é aplicada, ou seja, a resistência em escoar ou cisalhar.

A relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento pode definir o comportamento reológico dos fluidos viscosos. Para cada diferente tipo de curva de fluxo, que seria a representação gráfica desse comportamento reológico, tem um diferente tipo de fluido que tem sua própria equação de fluxo. A seguir temos graficamente a representação de alguns tipos de curva de fluxo na Figura 2.5.

Figura 2.5. Curvas de fluxo características dos modelos matemáticos. (LOPES, 2009)



A análise experimental e a análise da relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, para uma determinada condição de temperatura e pressão, podem classificar os fluidos em diferentes tipos, o que resultará em diferentes representações gráficas. Basicamente os fluidos se classificam em Newtonianos e não-Newtonianos.

De acordo com Newton, os fluidos que possuem somente o parâmetro da viscosidade influenciado pela temperatura e pressão são então classificados como Newtoniano. Há uma proporcionalidade entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento, quando este tipo de fluido escoar em regime laminar.

Darley e Gray (1988) definem o escoamento de duas maneiras, laminar e turbulento. Reynolds demonstrou essa teoria para um fluido que escoar em um tubo circular ou com baixa velocidade, fazendo um escoamento laminar; em altas velocidades ou em um tubo de grande diâmetro, o escoamento será turbulento.

Sendo essa proporção constante, só haverá um valor de viscosidade para um determinado valor de temperatura e pressão. Matematicamente, esses fluidos são regidos pela Equação (4) linear já mencionada anteriormente conhecida como a equação de Newton.

De acordo com Machado (2002), fluidos os quais não obedecem a uma relação constante entre a relação tensão e taxa de cisalhamento, mesmo a uma temperatura e pressão constante, são chamados fluidos não-Newtonianos. Diferentemente dos fluidos Newtonianos, esses não possuem taxa de cisalhamento constante com relação à tensão de cisalhamento, e dependendo do comportamento desses fluidos representados graficamente, para cada curva de fluxo temos um diferente modelo matemático o qual essa curva se adequa.

Na indústria do petróleo esse tipo de fluido está bem presente, pois são fluidos que se compõem de uma dispersão de sólidos em líquido que interagem entre si havendo solvatação do sólido. Um exemplo disso pode ser a solução de argila em água, soluções de polímeros ou os fluidos gelificados usados nas operações de perfuração. (PETROBRÁS, 1991)

Os principais modelos que podem se adequar com diferentes tipos de curva de fluxo podem ser o de Bingham, Ostwald de Waale e Herschell-Buckley.

### 3.2.1 Modelo de Bingham ou plástico ideal

Machado, (2002), relata que para o modelo de Bingham, que também pode ser denominado de modelo do plástico ideal, é necessário que haja uma tensão mínima, chamada de limite de escoamento,  $\tau_L$ , para que a deformação cisalhante aconteça. Se uma tensão é aplicada ao fluido com intensidade menor que a necessária para colocar o fluido em escoamento, o fluido simplesmente se comporta como um sólido. A Equação (5) matemática que define o modelo de Bingham é ilustrada a seguir:

$$\tau = \mu_p \gamma + \tau_L \quad (5)$$

Na qual  $\mu_p$  trata-se da viscosidade plástica que é decorrente do atrito gerado entre as partículas dispersas na solução e as moléculas do líquido dispersante. Essa constante é um parâmetro equivalente à viscosidade do fluido Newtoniano, e nesse caso é a responsável pela resistência do escoamento. A medida que a concentração de partículas dispersas aumenta, conseqüentemente, sua viscosidade plástica também irá aumentar. Já  $\tau_L$  é o limite de escoamento presente devido à interação intermolecular das partículas dispersas. E sua variação se dá em relação ao potencial iônico do meio, ou seja, quanto mais fortes forem as forças eletrostáticas da interação entre as partículas, maior será o limite de escoamento.

Um dos fluidos mais comuns a apresentarem o comportamento segundo o modelo de Bingham é o de dispersão de argila bentônica em água utilizadas para a perfuração de poços, e também dispersões de calcita em água.

### 3.2.2 Modelo de Ostwald de Waale ou Fluido de Potência

O modelo de Ostwald de Waale também conhecido como modelo de fluido de potência é um modelo mais restrito e não se aplica a qualquer fluido. Ele pode ser representado pela Equação (6) matemática a seguir:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (6)$$

Na equação anterior o “K” representa o parâmetro do índice de consistência, que pelo próprio nome indica o quão consistente é o fluido analisado e o seu grau de resistência perante o escoamento. O parâmetro “n” é o índice de comportamento, sendo que o “n” só pode assumir valores entre o intervalo de  $0 < n < 1$  desde que sejam fluidos pseudoplásticos, ou seja, que diminuem a sua viscosidade de acordo com o aumento de da taxa de cisalhamento; para valores de  $n > 1$ , isso representa os fluidos dilatantes, que ao contrário dos pseudoplásticos, eles aumentam a viscosidade de acordo com o aumento da taxa de cisalhamento. Como os fluidos Newtonianos se comportam de forma a apresentar uma equação matemática linear, logo, para esse caso,  $n=1$ . O que se pode concluir da análise do “n” é que sua variação indica um afastamento físico do modelo de comportamento que o fluido Newtoniano apresenta. (Bourgoyne Junior *et al.*, 1986).

Vários fluidos não-Newtonianos se encaixam ao modelo de fluidos pseudoplásticos, como as soluções poliméricas, que são exemplos mais comuns da indústria do petróleo. Algumas vezes, se faz necessário o controle do comportamento reológico desse fluido, pois se houver o estreitamento de tubos e, conseqüentemente, o aumento da velocidade do fluxo em alguma fase da linha de perfuração, a viscosidade do fluido diminui consideravelmente de acordo com o aumento da taxa de cisalhamento ocorrente. (Machado, 2002)

A natureza interna do fluido pseudoplástico é composta por pequenas partículas de diferentes formatos, podendo ser em forma de placas, gotas ou filamentos. Essas partículas se encontram dispersas de modo irregular quando em repouso, e por tal motivo, quando o fluido é colocado em movimento, este apresenta uma resistência contra o fluxo, dando a este fenômeno o nome de viscosidade.

A medida que a taxa de cisalhamento é aumentada, as partículas irregulares que se encontram dispersas na solução, acabam se orientando na mesma direção do fluxo, de forma paralela à força que sustenta esse efeito. De tal maneira, com as partículas alinhadas, há a

diminuição da resistência apresentada quando em repouso e, conseqüentemente, reduz-se a viscosidade.

### 3.2.3 Modelo de Herschell-Buckley

E o modelo de Herschell-Buckley, que seria o modelo de fluido de potência modificado, é representado pela Equação (7) a seguir:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n + \tau_0 \quad (7)$$

Percebe-se que a equação ilustrada anteriormente é bem parecida à equação de Ostwald de Waale, exceto pelo parâmetro  $\tau_0$ , denominado limite de escoamento real. Machado (2002) conceitua que a expressão anterior trata-se da representação matemática de um fluido plástico, e analisando reologicamente, são dispersões que quando paradas ou em repouso formam uma rede intermolecular. As forças que unem essas partículas impedem a variação da posição do fluido, resistindo logo assim ao escoamento, caracterizando-o como um fluido semissólido devido a sua alta viscosidade. Somente com uma força superior ao limite de escoamento real, é que haverá a quebra dessa rede intermolecular e então ocorre o escoamento.

Alguns materiais como argila com polímeros, empregados na indústria do petróleo como fluidos de perfuração, são exemplos de fluidos plásticos.

A Tabela 2.2 a seguir representa um resumo dos principais modelos matemáticos citados anteriormente, suas devidas expressões matemáticas com os parâmetros reológicos envolvidos em tais equações e os exemplos mais comuns aos quais se aplicam cada tipo de modelo.

Tabela 2.2. Equações de modelos matemáticos. (Machado, 2002)

Modelo	Equação	Parâmetros	Exemplos
Newton	$\tau = \mu\dot{\gamma}$	Viscosidade dinâmica absoluta	Água, ar e mel.
Bingham	$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_L$	Viscosidade plástica e limite de escoamento	Dispersões coloidais concentradas
Ostwald de Waale	$\tau = K(\dot{\gamma})^n$	Índice de consistência e índice de comportamento	Dispersão de polímeros
Herschell-Buckley	$\tau = K(\dot{\gamma})^n + \tau_0$	Índice de consistência, índice de comportamento e limite de escoamento real.	Dispersões de polímeros com argilas

Na indústria do petróleo os parâmetros reológicos estabelecem o comportamento do fluido de perfuração. A partir dessa análise é possível calcular perdas de carga na tubulação e a velocidade de transporte do cascalho. (THOMAS, 2004)

Segundo Darley e Gray, 1988, as propriedades do fluxo do fluido de perfuração estão diretamente ligadas à remoção do cascalho, mas influenciam o progresso da perfuração de várias outras maneiras também. O desempenho não satisfatório do fluido pode acarretar sérios problemas como, o preenchimento do fundo do poço com cascalho, a redução da taxa de perfuração, o alargamento do poço, a perda de circulação e até mesmo “blowout”.

O comportamento do fluxo é coordenado pelo regime do mesmo e pela relação entre pressão e velocidade. Há dois tipos de regimes de fluxo, o chamado laminar, o qual prevalece a uma baixa velocidade de fluxo e é em função das propriedades viscosas do fluido; e o chamado turbulento que é governado pelas propriedades inertes do fluido e é influenciado indiretamente pela viscosidade. (DARLEY E GRAY, 1988).

Quando a matéria apresenta uma resistência à força de deformação, conhecida também como força de cisalhamento, esse fenômeno tem o nome de viscosidade, e a aplicação dessa força influencia na maioria dos aspectos do fluido de perfuração relacionados à viscosidade, segundo o *Drilling Fluids Processing Handbook*, 2005. Sendo assim, a reologia se torna a propriedade mais comumente monitorada do fluido de perfuração, que mais adiante teremos um maior aprofundamento sobre a teoria dessa propriedade tão importante que foi a base de estudo desse trabalho.

A tixotropia é uma propriedade que alguns fluidos têm devido a sua composição. Essa propriedade tem a característica de adquirir um estado gelificado, chamado de semirrígido, quando o fluido polimérico está em repouso e retorna à sua fluidez quando é colocado em movimento. Thomas, 2004, também explica que a força gel é um parâmetro de natureza reológica que indica, de acordo com a interação elétrica entre as moléculas dispersas, o nível de gelificação da cada fluido.

Estudos reológicos são feitos no início analisando a resistência que o fluido apresenta quando é colocado em movimento, ou seja, para atingir a fluidez; e ao final, mede-se a resistência que o fluido apresenta quando, após certo tempo de repouso, é colocado em movimento novamente. Segundo Thomas, 2004, o cálculo da tixotropia então é feito pela diferença dessas duas resistências medidas.

Idealmente falando, a força gel deve ser alta o suficiente para manter suspensos a barita e o cascalho quando a circulação do fluido é parada. Darley e Gray, 1988, especificaram que se a força gel for muito pequena, ela pode ser aumentada com a adição de bentonita.

Por outro lado, forças géis muito altas não são interessantes, pois elas retardam a separação do cascalho e de gases de formação na superfície. Porém, no início, esse alto valor se torna interessante justamente por fazer o retardamento das bolhas de gases de formação, impedindo-as que subam no estágio superficial. (DRILLING FLUIDS PROCESSING HANDBOOK, 2005).

---

CAPÍTULO 4

ESTADO DA ARTE

---

#### 4 ESTADO DA ARTE

O polímero e, conseqüentemente, sua reologia estão presentes em várias etapas da indústria do petróleo, como a perfuração e a completação. Na indústria de fluidos de perfuração são realizadas as análises comportamentais reológicas das soluções poliméricas que compõem esses fluidos. Darley & Gray, 1988, relatam como foi o surgimento de um novo segmento que tanto auxilia a indústria do petróleo e seu desenvolvimento ao decorrer dos anos de acordo com as necessidades enfrentadas na operação de perfuração.

A seguir será feita uma apresentação de forma resumida de alguns trabalhos realizados sobre a importância da análise do comportamento reológico e também estudos sobre algumas soluções poliméricas que compõem estes fluidos, e as áreas correlacionadas ao tema deste trabalho.

Machado, 2002, defende a ideia de que tão importante é o estudo dos conceitos básicos da reologia para a indústria do petróleo, pois esta auxilia a previsão do comportamento de fluxo dos vários tipos de fluidos que são aplicados na perfuração, dos fluidos envolvidos na produção do poço e do próprio transporte e refino do petróleo. Com esses cálculos, Machado, 2002, afirma que é possível estimar inúmeros parâmetros como a perda de carga, a capacidade de sustentação do cascalho e também conhecer melhor as especificações dos fluidos envolvidos nessa área. Ele conclui que vários fluidos da indústria do petróleo são classificados como fluidos não-Newtonianos, por exemplo, as dispersões de argila em água, emulsões concentradas de água e óleo, soluções poliméricas, fluidos gelificados utilizados nas etapas de perfuração e completação, e até mesmo o petróleo em si e seus derivados.

Borges et al., 2009, apresenta o comportamento de gomas xantanas produzidas por *Xanthomonas arboricola pv pruni* utilizadas como viscosificantes de fluidos de perfuração. A análise foi feita para soluções aquosas e salinas medindo a viscosidade em diferentes temperaturas. Uma modelagem matemática foi feita ajustando o comportamento das soluções ao modelo de Ostwald de Waale e obtendo os respectivos parâmetros de índice de consistência,  $k$ , e o índice de comportamento,  $n$ . Devido à baixa concentração de sais das xantanas produzidas, chegou-se à conclusão que podem ser utilizadas em fluidos de perfuração de solução salina com um alto potencial de atuação.

Em Kassab et al., 2011, relações empíricas da reologia de fluidos não-Newtonianos de base aquosa e não-aquosa foram examinadas utilizando dados obtidos de medidas feitas em campo. As análises reológicas feitas indicam que as perdas de circulação dos fluidos de base não-aquosa são maiores que as perdas de circulação dos fluidos de base aquosa devido à

diferença de reologia de ambos. Ainda foi feito um aprofundamento desses estudos e a reologia apresentou que os fluidos de base aquosa poliméricos perdem sua viscosidade quando expostos a altas temperaturas e altas taxas de cisalhamento.

Güngör e Karaoglan, 2001, abordam em seu trabalho as propriedades de fluxo da bentonita em sistemas aquosos com a adição de poliacrilamida aniônica de diferentes concentrações e a partir das soluções preparadas as propriedades reológicas do fluido foram analisadas. Os resultados mostram que as moléculas de poliacrilamida e de argila interagem entre si. Mostram também que os polímeros aniônicos são eficientes floculantes, porém atuam também como desfloculantes quando em sistemas aquosos em conjunto com argilas de cargas negativas, mostrando assim a importância da troca iônica entre a bentonita e a poliacrilamida.

Caenn e Chillingar, 1996, apresentam como os polímeros modificam as funções e as propriedades dos fluidos quando presentes em concentrações suficientes. Mostram que, a poliacrilamida, por exemplo, pode agir como controlador de perda de fluido e os polímeros assim modificados também aumentam a viscosidade do fluido e proporcionam melhor carregamento dos sólidos. O fenômeno é explicado no trabalho pelo fato da poliacrilamida ser aniônica e os sólidos serem de natureza catiônica, a diferença de cargas faz com que haja atração entre essas partículas.

No *Drilling Fluids Processing Handbook*, 2005, discutem como os aditivos influenciam nas características dos fluidos aos quais são utilizados e que muitos produtos que diminuem a consistência do fluido são constantemente adicionados tanto em fluidos de base aquosa como em fluido de base não-aquosa. A finalidade do uso desses produtos é a de reduzir a viscosidade de fluidos de alta densidade quando submetidos a taxas de cisalhamento altas. Os resultados mostram que caracterização reológica dos fluidos aditivados com esse tipo de produto apresenta uma redução da viscosidade também sob baixas taxas de cisalhamento. A conclusão que se chegou foi a de que uma das soluções para evitar esse efeito é reduzir a alta quantidade de bentonita e outras argilas utilizadas como controladores de filtração, ou então, trabalhar com sistemas de fluidos que providenciem alta capacidade de tensão de cisalhamento e reologia do tipo de Bingham, como os fluidos aditivados com polímeros xantanados.

---

CAPÍTULO 5  
METODOLOGIA  
EXPERIMENTAL

---

## 5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 5.1 Materiais

Os materiais e o procedimento experimental que foram utilizados para realizar essas análises serão descritos a seguir, desde a preparação das soluções até a modelagem matemática envolvida, para chegar aos resultados dessa pesquisa.

#### 5.1.1 Aditivos

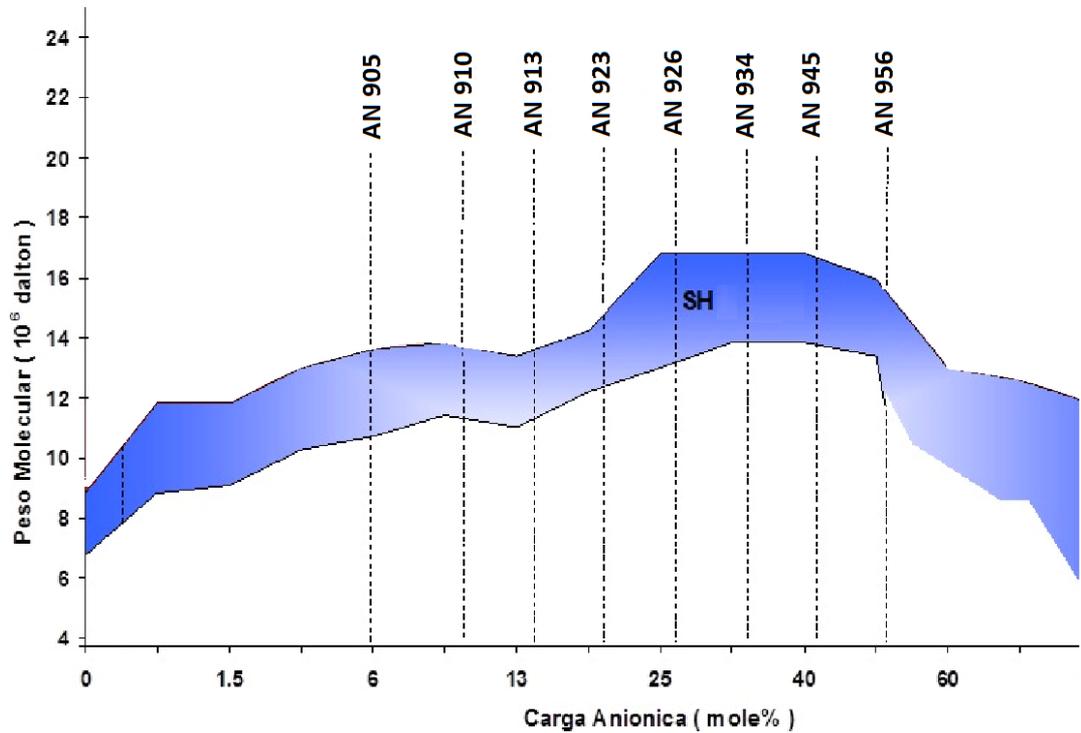
Os aditivos utilizados na preparação das soluções que foram analisadas nesta pesquisa são poliacrilamidas aniônicas disponibilizadas pela empresa francesa de polímeros SNF FLOERGER e estão citados na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1. Aditivos utilizados para preparação das soluções poliméricas.

Aditivos Poliméricos
AN 905 SH
AN 910 SH
AN 913 SH
AN 923 SH
AN 926 SH
AN 934 SH
AN 945 SH
AN 956 SH
AN 977 SH

A família polimérica estudada é aniônica, ou seja, com carga negativa. São polímeros floculantes, orgânicos com ionicidade específica, todos possuem peso molecular muito alto e são disponíveis na forma de pó. Sua faixa de distribuição de peso molecular pode ser representada graficamente a seguir em função do percentual em mol da carga iônica das moléculas como mostra a seguinte Figura 4.1 para alguns polímeros.

Figura 4.1. Peso molecular em função da carga iônica das poliacrilamidas aniônicas SH



Fonte: Material informativo SNF FLOERGER, 2006.

Como se pode observar na Figura 4.1, a faixa de distribuição do peso molecular dos polímeros tende a crescer para os componentes centrais da figura, e decresce nas extremidades da faixa azul representativa para as famílias SH. A carga iônica, no entanto, se comporta de maneira crescente começando com baixos valores para os primeiros polímeros e sendo mais alta para o último polímero analisado.

Na Tabela 4.2 a seguir apresenta-se a classificação da densidade de carga, do peso molecular e da viscosidade para as concentrações de 0,1% e 0,5%, o menor e o maior valor, respectivamente, que a empresa recomenda que se concentrem as soluções para operações com as poliacrilamidas do grupo SH.

Tabela 4.2. Classificação da densidade de carga, do peso molecular e da viscosidade para concentrações de 0,1% e 0,5% para as poliacrilamidas aniônicas da família polimérica SH.

<b>Poliacrilamidas</b>	<b>Densidade da Carga</b>	<b>Peso Molecular</b>
AN 905 SH	Muito Baixa	Muito Alto
AN 910 SH	Baixa	Muito Alto
AN 913 SH	Baixa	Muito Alto
AN 923 SH	Média	Muito Alto
AN 926 SH	Média	Muito Alto
AN 934 SH	Média	Muito Alto
AN 945 SH	Alta	Muito Alto
AN 956 SH	Alta	Muito Alto
AN 977 SH	Muito Alta	Muito Alto

Fonte: Catálogo de Produtos, SNF FLOERGER.

### 5.1.2 Equipamentos

O Núcleo de Pesquisa em Petróleo e Gás (NUPEG), do Departamento de Engenharia Química, da UFRN, cedeu todos os dispositivos de alta qualidade e precisão para a realização dos ensaios com considerável grau de repetibilidade e reprodutibilidade realizados nesta pesquisa. Na Tabela 4.3 a seguir estão listados todos os equipamentos que foram utilizados.

Tabela 4.3. Lista dos equipamentos utilizados para a realização dos experimentos.

<b>Equipamentos</b>	<b>Modelo</b>	<b>Marca</b>
Balança Analítica	B-TEC0210A	TECNAL
Agitador	-	Hamilton Beach
Reômetro	MARS	Thermo Scientific

## 5.2 Preparação das soluções

A preparação das soluções foi dada num agitador Hamilton Beach. Diferentes polímeros foram misturados em água em diferentes concentrações e deixados em repouso por 24 horas para estabelecer um tempo de hidratação igual para todas as soluções. A seguir temos a Figura 4.2 meramente ilustrativa do agitador utilizado.

Figura 4.2. Agitador utilizados na preparação das soluções.



Segue o passo-a-passo da preparação das soluções:

1. 350 mL de água destilada são adicionados ao copo metálico do agitador Hamilton Beach;
2. de acordo com cada concentração a ser analisada, que será especificada na Tabela 4.4 a seguir, pesa-se devidamente a massa de cada polímero adicionado;
3. adiciona-se o polímero com a água já sob agitação, pois este tende a se aglomerar rapidamente devido as condições ambiente de umidade, e então se agita por 5 minutos;
4. a solução polimérica deve repousar por 24 horas para que ocorra a completa hidratação do polímero.

Algumas especificações como a concentração a ser utilizada e o tempo de hidratação presentes neste trabalho foram determinadas após revisão bibliográfica de trabalhos científicos similares e inclusive o próprio catálogo que a empresa SNF FLOERGER fornece

de seus produtos. Para este sistema foi indicado que para a maioria dos polímeros a concentração máxima das soluções para operações utilizando-os fosse de 5g/l, como indicado na Tabela 4.4 a seguir, e que a estabilidade de soluções aquosas seria alcançada com 24h de hidratação em temperatura ambiente.

Tabela 4.4. Concentração dos polímeros adicionados na preparação das soluções.

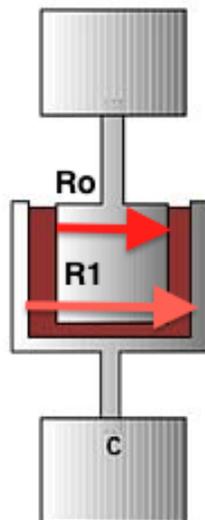
<b>Aditivos Poliméricos</b>	<b>Quantidade (%)</b>
Para todos os polímeros analisados	0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5

Após as 24 horas de hidratação da solução, esta pode ser analisada reologicamente.

### 5.3 Ensaios Reológicos

O modelo para se analisar a reologia dessas soluções foi o de cilindros coaxiais. Nesse método, 13mL de solução são adicionados ao copo do reômetro e então essa amostra é cisalhada no espaço anular entre os dois cilindros por um rotor que será inserido no interior desse copo automaticamente. Logo, sabe-se que o rotor e o copo possuem raios diferentes, sendo determinado por  $R_0$  o raio do rotor e  $R_1$  o raio do copo, como pode ser representado pela Figura 4.3 a seguir.

Figura 4.3. Ilustração dos sistema de cilindros coaxiais.



Tendo esse tipo de sistema, as Equações (8) e (9) podem ser obtidas na literatura e ser utilizadas para calcular a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, definidas anteriormente.

$$K_{\tau} = \frac{2}{1 - \left(\frac{R_0}{R_1}\right)^2} \quad (8)$$

$$K_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{2\pi L - (R_1)^2} \quad (9)$$

Das Equações (8) e (9):

$K_{\tau}$  = Constante da tensão de cisalhamento;

$K_{\dot{\gamma}}$  = Constante da taxa de cisalhamento;

$R_0$  = Raio do rotor;

$R_1$  = Raio do copo;

$L$  = Comprimento do rotor.

Os ensaios de reologia feitos no Reômetro Mars, mostrado na Figura 4.4 a seguir, geram resultados que são captados por um computador ligado ao aparelho, o qual armazena todos esses dados reológicos através de um software do próprio equipamento. Nesse software é possível selecionar diversos tipos de parâmetros para diversos tipos de análises.

Nos ensaios realizados para este trabalho os parâmetros foram os seguintes:

- Curvas de fluxo obtidas pelo modelo de CR, taxa de cisalhamento controlada, no intervalo de taxa de 10 até 1000 s<sup>-1</sup>;
- Temperatura constante, controlada pelo banho acoplado ao sistema, à 25°C para todas as soluções analisadas;
- Coleta de 100 dados amostrais em todos os experimentos realizados, para todas as soluções poliméricas de cada um dos aditivos listados na Tabela 4.1 individualmente e para cinco diferentes tipos de concentrações, como apresentadas na Tabela 4.4.

O software do programa gera os reogramas dos dados obtidos de tensão por taxa de cisalhamento. Por escolha do próprio operador, modelos matemáticos podem ser escolhidos, aos quais o programa aplica para calcular parâmetros referentes a cada equação

correspondente e assim podemos fazer a análise de qual modelo melhor representa o comportamento reológico do fluido em questão.

Figura 4.4. Reômetro MARS utilizado na realização dos experimentos.



Com os 100 dados gerados, uma análise do comportamento dos resultados foi feita para que os gráficos representativos das curvas de fluxo e das curvas de viscosidade fossem produzidos.

Percebeu-se que no início, somente para a curva de fluxo, o fluido apresenta um limite de escoamento diferente de zero, como pode ser constatado no capítulo de resultados, a seguir, deste trabalho.

Para que essa resistência fosse quebrada o sistema teve que aplicar uma força externa bem elevada, superando a força intermolecular da solução. Essa tensão de cisalhamento, depois de se alcançar o objetivo de colocar o fluido em escoamento, era demasiadamente alta para seguir sendo aplicada ao sistema depois de sua deformação. Pois as soluções, uma vez que em movimento, não tinham a necessidade de serem submetidas à tensões tão altas para permanecer em seu regime laminar, o que causa uma perturbação do estado inicial de coleta dos resultados. Utilizando o critério de se representar o real modelo de escoamento do fluido, e não de suas perturbações, foram descartados os cinco primeiros resultados obtidos no experimento.

Seguindo essa mesma linha de análise, mais ao fim da obtenção de dados também é notado que a taxa de cisalhamento, para as curvas de fluxo, passa a ser muito alta assim como a tensão, pois são variáveis diretamente proporcionais, e isso faz com que o fluido entre em regime turbulento, ou seja, para valores mais altos de taxa de cisalhamento o fluido não mais se comporta de maneira constante e sua viscosidade medida não condiz com a real viscosidade do fluido estudado que deve ser medida em regime laminar. Esse comportamento

fez com que para valores de taxa de cisalhamento acima de  $300 \text{ s}^{-1}$ , os resultados gerados a partir de então, fossem descartados.

Todas as composições gráficas deste trabalho foram realizadas no software ORIGIN e as curvas geradas foram de fluxo, caracterizada por taxa de cisalhamento ( $\text{s}^{-1}$ ) *versus* tensão de cisalhamento (Pa), e de viscosidade, composta por taxa de cisalhamento ( $\text{s}^{-1}$ ) *versus* viscosidade (cP); ambas para o mesmo polímero variando as curvas somente de acordo com sua concentração. Outro gráfico elaborado no mesmo programa foi a representação da curva de fluxo de todos os polímeros para uma única concentração.

Além dos resultados gráficos, uma modelagem matemática comparativa das cinco concentrações de um determinado polímero pôde ser feita também no software Excel Office. Os parâmetros de cada modelo matemático para cada polímero e com sua faixa de concentração variando de 0,1% a 0,5% foram importados e com isso foi possível se calcular o coeficiente linear de cada curva de fluxo para fins de análise de qual modelo melhor se adequa à representação de modelo sugerido se foi o de Bingham, o de Ostwald de Waale ou o de Herschell- Buckley.

---

CAPÍTULO 6  
RESULTADOS E  
DISCUSSÃO

---

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

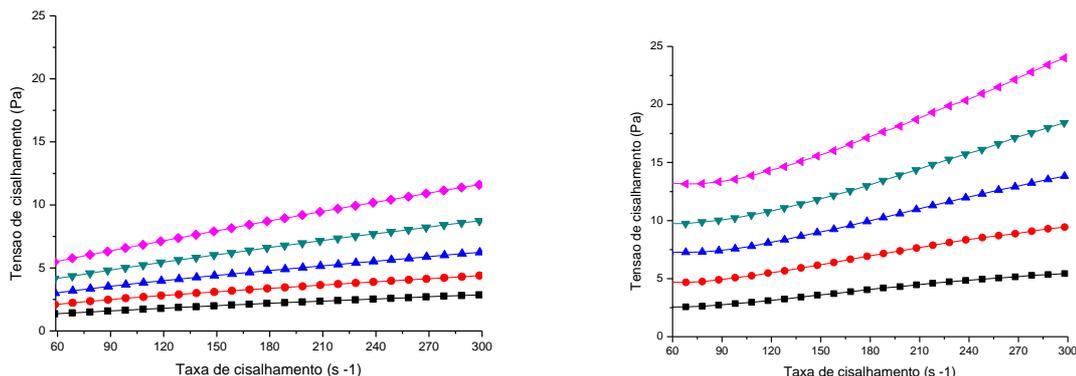
Este capítulo tem como finalidade apresentar os resultados dos ensaios de reologia para a família de poliácridamidas aniônicas estudada, variando o peso molecular dos polímeros.

### 6.1 Estudo reológico dos polímeros AN SH

Nas Figuras 5.1 (A) e (B) estão dispostas as curvas de fluxo para polímeros AN 905 SH e AN 977 SH. polímeros que possuem carga aniônica muito baixa e muito alta, respectivamente. Esses polímeros foram escolhidos por apresentarem a mesma tendência gráfica dos demais, mesmo tendo pesos moleculares e cargas aniônicas tão discrepantes. E com essa análise inicial pôde-se avaliar o comportamento de cada curva de fluxo que eles demonstram para diferentes concentrações e comparar com as curvas de fluxo teóricas que os modelos de Bingham, Ostwald de Waale e Herschell-Buckley caracterizam, apresentadas novamente na Figura 5.2.

Figura 5.1. Curvas de fluxo (A) e (B) em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) e da concentração (%) de AN 905 SH e AN 977 SH, respectivamente.

(—■—) 0,1%; (—●—) 0,2%; (—▲—) 0,3%; (—▼—) 0,4%; (—◆—) 0,5%



Como pode ser observado nos gráficos 5.1 (A) e (B) acima, em qualquer que seja a concentração de polímero na solução estudada, a qual varia de 0,1% até 0,5%, e independente do polímero, as curvas apresentam o comportamento de um fluido não-Newtoniano, quando têm sua origem com a interseção no eixo y em valores de tensão de cisalhamento maiores do que zero, ou seja, não partem da origem dos eixos.

Isso pode ser explicado pelo fato de apesar dos dados coletados descreverem um comportamento linear, tal como o fluido Newtoniano, é necessário aplicar uma tensão mínima para quebrar a rede intermolecular que a solução polimérica forma, trata-se de uma força maior que a força de rede, inserida no início para criar a deformação do sistema. O que se pode concluir dessa análise é que as curvas para todas as diferentes concentrações desses polímeros apresentam o mesmo comportamento das curvas de fluxo do modelo de Bingham.

Com todos os polímeros apresentando um comportamento reológico muito similar, se fez necessário comparar todos eles para uma mesma concentração e assim poder concluir qual deles possui o melhor desempenho. Através das curvas de fluxo e de viscosidade para todos os polímeros pôde-se realizar esta análise, e seguindo a sugestão da empresa em não ultrapassar a concentração de 0,5%, a concentração intermediária de 0,3% foi escolhida para o estudo dos gráficos a seguir.

Figura 5.3. Curvas de fluxo em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,3% para todos os polímeros

0,3%: (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

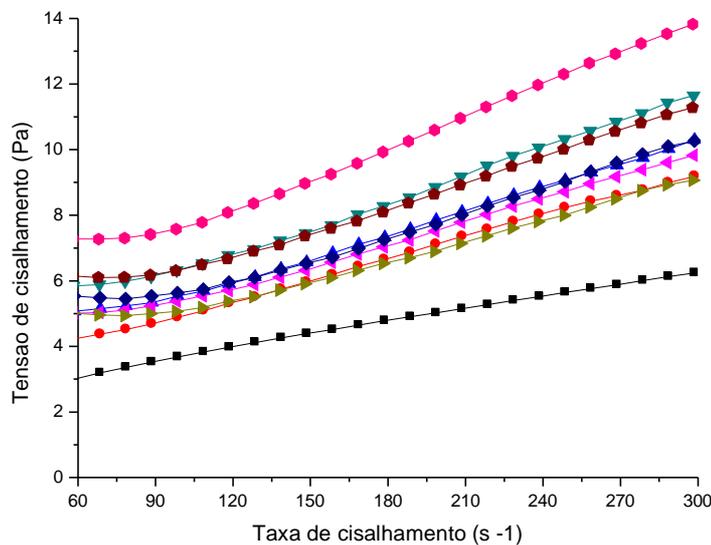
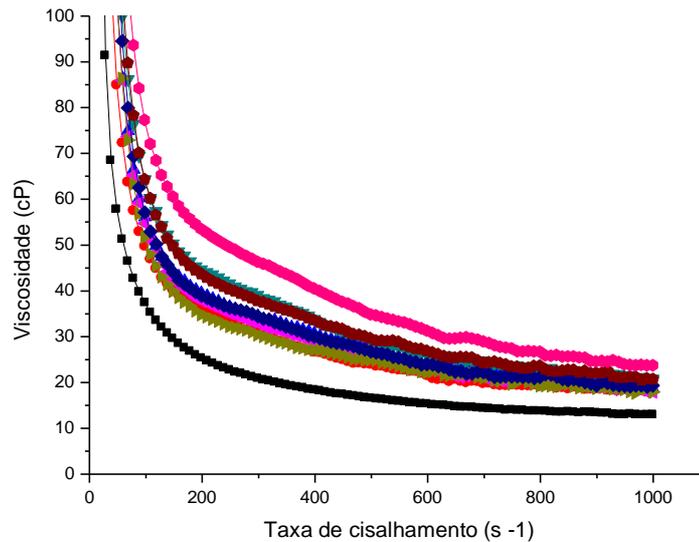


Figura 5.4. Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,3% para todos os polímeros

0,3%: (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;



As concentrações de 0,1% e 0,2% apresentaram uma viscosidade muito baixa, abaixo de 50 cP, não sendo apropriado para que haja mudanças reológicas significativas quando adicionadas nos fluidos de perfuração.

A concentração de 0,5% apresenta um limite de escoamento muito alto, ou seja, seria necessário aplicar uma força inicial muito alta para quebrar as forças de interação entre as partículas do fluido em repouso, também inviável para a indústria de petróleo. Além disso, quando essa resistência é muito grande, é possível que haja uma perda de parte da coluna de perfuração que não consegue ser colocada em rotação e então será necessário o uso de ferramentas de fundo de poço para capturar a parte perdida, aumentando o custo da operação.

E entre 0,3% e 0,4%, suas viscosidades são muito parecidas, no entanto o limite de escoamento do 0,4% é maior, não que o fluido de 0,3% não tenha também um limite de escoamento alto o suficiente para se comportar como um sólido quando a circulação estiver parada, impedindo que o cascalho desça para o fundo do poço, mas esse limite também não pode ser tão alto a ponto de não se conseguir colocar o fluido em movimento novamente, tendo então o mesmo motivo pelo qual o fluido de 0,5% não fosse escolhido. E uma vez que se estipula a faixa de viscosidade como um dos critérios mais importantes para que o fluido desempenhe um bom papel, a próxima variável que pode ser escolhida é a concentração. Pois se ambos atingem um resultado reológico adequado muito próximo, é preferível escolher uma menor concentração a maior, porque em consequência dessa escolha é possível proporcionar uma economia no custo total do processo de perfuração.

Ajustando o modelo reológico que melhor se adequa ao comportamento do fluido de acordo com sua apresentação gráfica se faz necessário agora que outras análises sejam feitas para que um dos polímeros estudados seja escolhido como o aditivo de preparação da solução

que mais condiz com os requerimentos que se faz se um fluido, e assim seus parâmetros podem ser interpretados.

Alguns fatores são muito relevantes para garantir que ele alcance um bom desempenho reológico e o estudo dos gráficos das curvas de fluxo e de viscosidade mostra que o polímero de mais alto peso molecular, o AN934SH, apresenta a mesma tendência comportamental que os demais. Isso permite que uma menor concentração desse polímero seja utilizada a fim de se alcançar uma mesma faixa de viscosidade da solução.

Do primeiro gráfico, 5.3, pode-se constatar que a inclinação da reta do fluido preparado com esse mesmo polímero, fornece o parâmetro da viscosidade plástica na mesma tendência que os demais. Trata-se de uma característica muito importante, pois o que se deseja de um fluido é que, em caso de parada da circulação do mesmo, ele atue de maneira a se gelificar e não deixar que o cascalho, suspenso pelo fluido, caia para o fundo do poço, ou seja, possuindo uma viscosidade plástica ideal.

Porém, o que o faz ter uma atuação distinta dos demais é outro fator que pode ser analisado, o ponto de partida da sua reta. A interseção da curva de fluxo com o eixo y é a representação numérica para o limite de escoamento, e para a solução preparada com AN934SH, analisando na mesma faixa de viscosidade plástica que os demais, ele foi o que apresentou o menor valor.

Do segundo gráfico, representado na Figura 5.4, a interpretação da viscosidade será vista de uma perspectiva diferente que foi vista para o primeiro gráfico, Figura 5.3. É importante sim que seja alta o suficiente para carrear o cascalho, mas também outra característica que essa propriedade traz é o modo de como se comporta à medida que o experimento se evolui.

Para todos os polímeros à concentração de 0,3%, o comportamento das soluções mostra que à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, a viscosidade da solução decai comprovando sua característica como um plástico de Bingham. E para o polímero em destaque, o AN934SH, esse comportamento não muda, como pode ser notado no próprio gráfico da Figura 5.4 e na Tabela 5.1 a seguir composta das taxa de cisalhamento e da sua respectiva viscosidade, depois de descartados os dados iniciais de perturbação do sistema.

Tabela 5.1. Dados de taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) e de viscosidade (cP) para o polímero AN 934 SH na concentração de 0,3%.

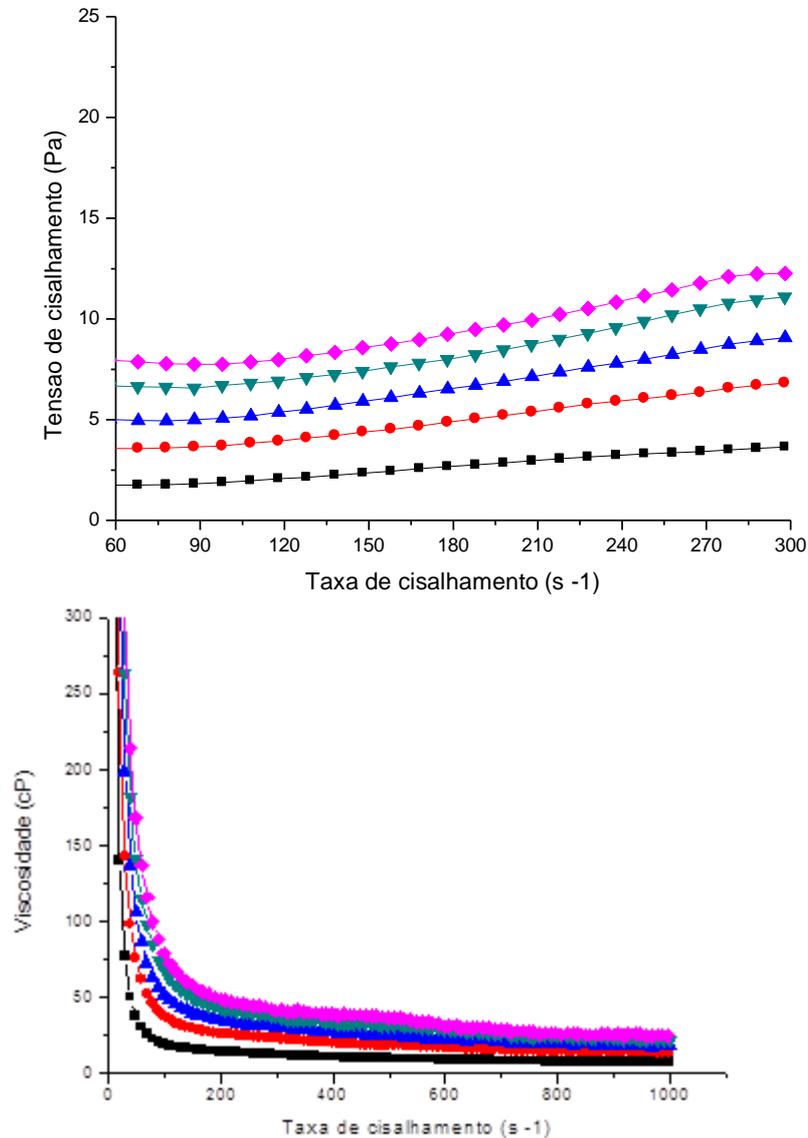
<b>Taxa de cisalhamento</b> ( $s^{-1}$ )	<b>Viscosidade</b> (cP)
48,04	106
58,03	86,37
68,03	72,89
78,03	63,27
87,99	56,8
98	51,69

Agora uma interpretação dos resultados obtidos para o AN 934 SH, individualmente, será realizada mais a fundo.

As Figuras 5.5 (A) e (B) expõem as curvas de fluxo (Pa.s) e da viscosidade (cP) em função da taxa de cisalhamento, medida em ( $s^{-1}$ ), para soluções preparadas com a poliacrilamida AN934SH com concentrações que variam de 0,1% até 0,5%.

Figura 5.5 Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN934SH no fluido.

(—■—) 0,1%; (—●—) 0,2%; (—▲—) 0,3%; (—▼—) 0,4%; (—◆—) 0,5%



A poliacrilamida AN934SH é um polímero de peso molecular muito alto e a densidade de sua carga iônica é média. Seu comportamento reológico foi destacado dos demais por apresentar melhor desempenho quando comparados à mesma concentração.

Como demonstrado no gráfico (A) acima da Figura 5.5, a poliacrilamida AN934SH, para todas as concentrações em solução analisadas, as quais são variadas de 0,1% até 0,5%, o comportamento comprova que é o de um fluido não-Newtoniano, quando não temos nenhuma de suas curvas de fluxo partindo da origem dos eixos da taxa de cisalhamento e da tensão de cisalhamento.

As curvas apresentam todas uma inclinação considerável para que constate a presença da viscosidade plástica, e seus limites de escoamento, exceto pela concentração de 0,1% que é uma concentração que pouco influencia no comportamento do fluido, estão todos numa faixa nem tão alta que faça com que o escoamento seja difícil de ser implantado ao sistema novamente, nem tão baixa deixando de se comportar como um sólido quando o fluido se encontra em repouso.

O que se conclui da interpretação gráfica das curvas de fluxo da Figura 5.5 (A), é que o polímero AN934SH mostra o equilíbrio desejado que se espera de um aditivo viscosificante, aumenta a viscosidade do fluido para manter a suspensão do cascalho, mas que a sua resistência ao escoamento, uma vez que o fluido esteja parado, não seja muito elevada a ponto de ter que aplicar uma força rotacional à coluna de perfuração muito alta e, conseqüentemente, a inserção de mais energia ao processo de perfuração.

O aumento da concentração de AN934SH no meio acarreta também um crescimento da viscosidade, que pode ser verificado na análise do gráfico (B) da Figura 5.5. A viscosidade decai consideravelmente com o aumento da taxa de cisalhamento, quando o fluido é colocado em escoamento. Este comportamento permite classificar o polímero como um agente com alta capacidade de alterar as propriedades reológicas do fluido. Por esse motivo, quando aplica-se uma tensão com o objetivo de colocar o fluido em movimento, o fluido reage com uma resistência contra o fluxo, denominada viscosidade. As soluções preparadas com esse polímero apresentaram um alto valor atribuído para a viscosidade que será discutido posteriormente com resultados numéricos.

O polímero escolhido comprova sua eficácia à baixa taxa de cisalhamento uma vez que é nessa faixa que apresenta suas maiores viscosidades. Mas mesmo apresentando uma notável viscosidade no começo, a intensificação da taxa de cisalhamento faz com as partículas irregulares presentes no meio se reorganizem orientando-se na mesma direção do fluxo. Assim sendo, a resistência apresentada quando o fluido se encontra em repouso decai e facilita a partir de então o escoamento do fluido.

A Tabela 5.2 dispõe os parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e Herschell-Buckley, e o coeficiente linear para cada solução de diferente concentração aditivado com a poliacrilamida AN 934 SH para comprovar numericamente o comportamento apresentado pelos gráficos das Figuras 5.5 (A) e (B) anteriormente apresentados.

Tabela 5.2 Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN934SH.

AN 934 SH (%)	<i>Modelo de Bingham</i>		<i>Coefic. Linear</i> <b>R</b>	<i>Modelo de Ostwald de Waale</i>		<i>Coefic. Linear</i> <b>R</b>	<i>Modelo de Herschell-Buckley</i>			<i>Coefic. Linear</i> <b>R</b>
	<i>Parâmetros</i>			<i>Parâmetros</i>			<i>Parâmetros</i>			
	$\mu_P$	$\tau_L$	<b>n</b>	<b>k</b>	$\tau_0$	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>		
0,1	0.005818	1.751	0.993	0.5504	0.1602	0.9846	1.392	0.0175	0.8457	0.9946
0,2	0.01058	3.364	0.9898	0.5298	0.3389	0.9867	2.298	0.05509	0.77	0.9935
0,3	0.01421	4.549	0.9884	0.5279	0.462	0.9858	3.095	0.07522	0.7678	0.9922
0,4	0.01745	5.889	0.9822	0.5138	0.6328	0.9799	3.946	0.1034	0.7524	0.9867
0,5	0.01849	7.093	0.9758	0.4784	0.8825	0.9743	4.681	0.1371	0.7218	0.9814

Com a finalidade de se verificar numericamente qual equação matemática melhor se enquadra com o comportamento reológico das soluções poliméricas, uma modelagem foi feita para todas as diferentes concentrações das soluções preparadas, concentração essa que varia de 0,1% até 0,5% para o polímero AN 934 SH. A partir dos resultados obtidos, com valores do coeficiente linear, R, todos acima de 0.97, conclui-se que os três modelos dispostos poderiam representar de maneira coerente o comportamento das soluções elaboradas com a poliacrilamida AN 934 SH.

Porém, o impasse que se chega ao analisar as soluções preparadas com as poliacrilamidas deste trabalho é que todos eles apresentam um comportamento gráfico linear, ou seja, qualquer equação matemática utilizada para ajustar aos dados obtidos, será adequada, justamente pelo fato de ser linear. Mas mesmo que a modelagem apresente adequação, como pode ser percebido, o que caracteriza seu comportamento de mesma tendência a algum modelo reológico será sua curva de fluxo, que, neste caso, indicou ser um plástico de Bingham.

O modelo matemático de Bingham apresentou bons resultados para os parâmetros de viscosidade plástica,  $\mu_P$ , e de limite de escoamento,  $\tau_L$ , quando comparados com os mesmos parâmetros dos demais polímeros. A viscosidade plástica,  $\mu_P$ , manteve um comportamento muito similar às demais soluções aditivadas com as poliacrilamidas da família SH. Para o polímero AN 934 SH, o fenômeno da viscosidade pode ser explicado pelo fato de haver moléculas pesadas dispersas no meio que causam o atrito de maior intensidade entre elas e as

moléculas do líquido dispersante, a água. E a resistência apresentada contra o escoamento traz um valor relativamente alto que aumenta em decorrência do incremento da concentração de AN 934 SH à solução. Sendo assim trata-se de um polímero adequado para ser utilizado como viscosificante em fluidos de perfuração, mostrando ter capacidade de impedir que os sólidos gerados na perfuração caiam para o fundo do poço.

Com densidade de carga média, as soluções preparadas com o polímero AN 934 SH evidenciam o efeito de valores médios para o parâmetro limite de escoamento,  $\tau_L$ , por haver uma intensidade das forças de interação entre as partículas do meio, e essa força de interação cresce com o aumento da concentração das soluções analisadas, pois a adição de mais polímero ao meio incrementa o potencial iônico da solução e isso aumenta as forças eletrostáticas das partículas.

Tendo um polímero que apresenta soluções plásticas de Bingham, a interpretação dos demais parâmetros da modelagem feita para os modelos de Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley se faz desnecessárias. E todos os demais reogramas representados de forma gráfica e as tabelas de modelagem matemática para os demais polímeros podem ser encontrados anexados a este trabalho no Apêndice 1. Por apresentarem comportamento similar, eles foram representados pelo AN 934 SH e reunidos ao final.

---

CAPÍTULO 7  
CONCLUSÃO

---

## 7 CONCLUSÃO

Com relação ao comportamento reológico das soluções poliméricas estudadas pode-se concluir que existe um padrão encontrado na variação das propriedades reológicas. Mesmo com o aumento do peso molecular e de densidade de carga do polímero, as curvas de fluxo (Pa.s) e de viscosidade (cP) em função da taxa de cisalhamento, medida em ( $s^{-1}$ ), para todas as diferentes concentrações de soluções preparadas com cada uma delas, variando de 0,1% até 0,5%, confirma a tendência que as soluções poliméricas possuem diante da variação da viscosidade e da tensão em relação à taxa cisalhante.

Uma vez que as curvas de fluxo não partem da origem dos eixos da taxa de cisalhamento e da tensão de cisalhamento para nenhum deles, conclui-se que são soluções não-Newtonianas.

A análise dos gráficos da viscosidade comprova que o aumento da concentração dos polímeros no meio aumenta conseqüentemente a viscosidade, mas a medida que as soluções são aditivadas, a partir do momento que há uma taxa de cisalhamento também crescente, essa viscosidade começa a decair.

Chega-se a conclusão que a família de poliacrilamidas estudada tem a capacidade de alterar significativamente as propriedades reológicas das soluções às quais são adicionadas, sendo de grande interesse à indústria do petróleo para a formulação de fluidos de perfuração que se fazem necessárias alterações de suas propriedades reológicas para satisfazer os critérios exigidos.

Os dados obtidos permitem que seja concluído que todos os modelos de Bingham, Ostwald de Waale e Herschell-Buckley se enquadram quase que perfeitamente ao comportamento de todas as soluções analisadas para todos os diferentes polímeros.

Mas se as curvas de fluxo confirmam que o modelo ideal para representar as soluções preparadas com poliacrilamidas aniônicas da família SH é o modelo de Bingham, esse é o modelo que melhor representa o comportamento reológico, independente da modelagem.

---

CAPÍTULO 8  
REFERÊNCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS

---

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNIS R. M.; SMITH V. M. *Drilling Fluids Technology* Revised Edition Exxon Company U.S.A, 1996.

BORGES, C. D. et al. - *Comportamento reológico de xantana produzida por Xanthomonas arboricola pv pruni* para a aplicação em fluido de perfuração de poços de petróleo. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 19, nº 2, p. 160-165, 2009.

BOURGOYNE JUNIOR, A. T. et al. *Applied Drilling Engineering*. TEXAS USA: SPE Textbook, 2 v, 1986.

DARLEY, H.C.H.; GRAY, G.R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Fifth Edition, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1988.

DIAZ, E. *Reologia aplicada a revestimentos de papel*. Curso de especialização em papel e celulose. 2002.

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

GÜNGÖR, N.; KARAOGLAN, S. Interactions of polyacrylamide polymer with bentonite in aqueous system. *Materials Letters* 48 (2001) 168–175. Elsevier, 2000.

LOPES, C.E. *Carlos Edison – Viscosímetro ou Reômetro*, Disponível em: <http://carloседison.blogspot.com/2009/12/viscosimetro-ou-reometro.html>, Acesso em: 10 de agosto de 2012.

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

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

PEREIRA, E. *Química dos Polímeros e Aplicações – Parte I*, Disponível em: [www.systemmud.com.br](http://www.systemmud.com.br), Acesso em: 10 de janeiro, 2008 a.

PETROBRAS. *Manual de Fluidos de Perfuração*. Rio de Janeiro, CENPES, 1991.

KASSAB, S. Z.; ISMAIL, A. S.; ELESAWI, M. M. Drilling Fluid Rheology and Hydraulics for Oil Fields. *European Journal of Scientific Research*, Vol.57, No.1 p.68-86, 2011.

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

THOMAS, J. E., Organizador. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência, PETROBRAS, 2004.

[www.setor1.com.br/analises/reologia/cisa\\_figu.htm](http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cisa_figu.htm), Acesso em: 10 de agosto de 2012.

<http://www.ceramicindustry.com/articles/using-rheology-to-improve-manufacturing>, Acesso em 21 de Agosto de 2012.

---

# APÊNDICE

## A

---

## APÊNDICE A – Gráficos e modelagem matemática para os demais polímeros

Figura 1. Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN905SH nas soluções.

(—■—) 0,1%; (—●—) 0,2%; (—▲—) 0,3%; (—▼—) 0,4%; (—◆—) 0,5%

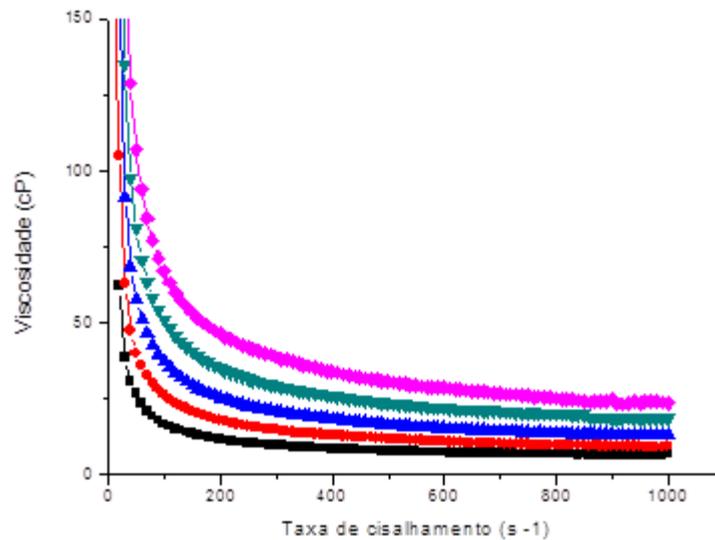


Tabela 1. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN905SH.

AN 905 SH (%)	Modelo de Bingham Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Ostwald de Waale Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Herschell-Buckley Parâmetros			Coefic. Linear R
	$\mu_p$	$\tau_L$		n	k		$\tau_0$	k	n	
0,1	0.00526	1.198	0.9976	0.6177	0.08635	0.9937	0.9104	0.01419	0.861	0.9987
0,2	0.007255	2.044	0.9957	0.5585	0.1858	0.9959	1.228	0.04346	0.7509	0.9996
0,3	0.01021	2.906	0.9953	0.5555	0.2674	0.9954	1.76	0.06098	0.7513	0.9991
0,4	0.01491	3.958	0.9944	0.5735	0.3403	0.9953	2.276	0.0896	0.7505	0.9984
0,5	0.01865	5.416	0.9924	0.5483	0.5149	0.9954	2.798	0.1541	0.7072	0.998

Figura 2. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN910SH nas soluções.

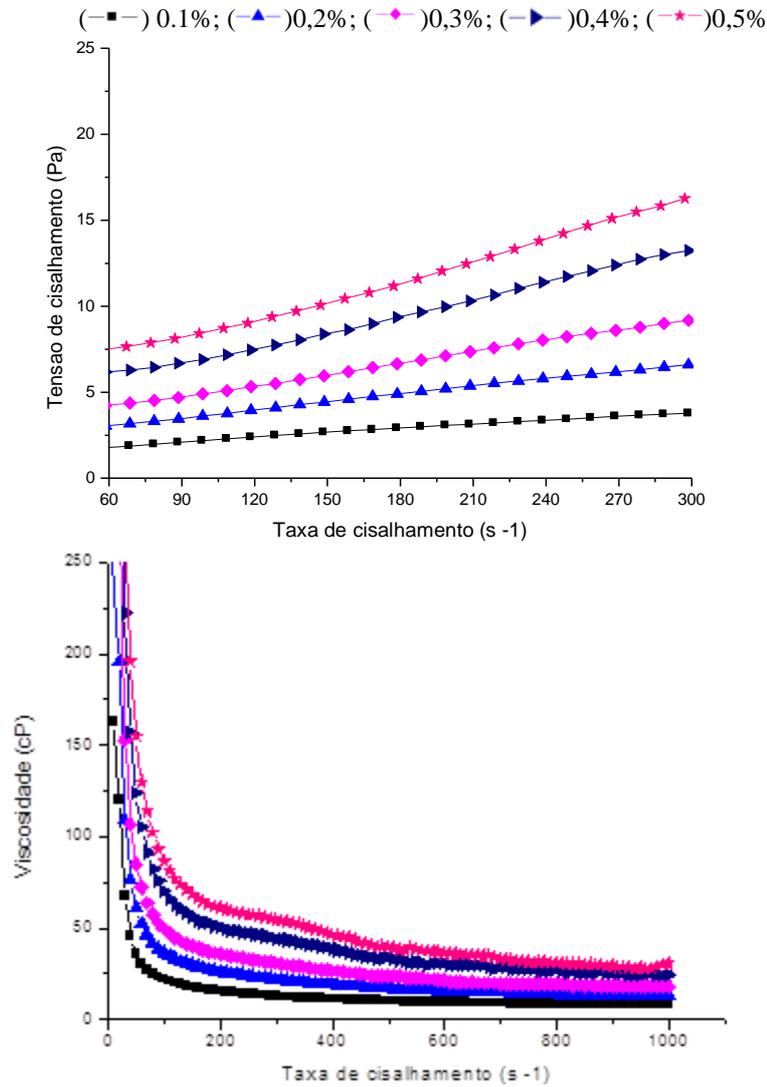


Tabela 2. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN910SH.

AN 910 SH (%)	Modelo de Bingham Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Ostwald de Waale Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Herschell-Buckley Parâmetros			Coefic. Linear R
	$\mu_P$	$\tau_L$		n	k		$\tau_0$	k	n	
0,1	0.006173	1.818	0.995	0.5487	0.1707	0.9937	1.179	0.03309	0.7662	0.9985
0,2	0.01013	3.155	0.9912	0.5311	0.3198	0.994	1.699	0.08662	0.7025	0.9971
0,3	0.01395	4.323	0.9899	0.5322	0.4364	0.9923	2.361	0.1154	0.7069	0.9955
0,4	0.01893	6.449	0.984	0.5054	0.7279	0.9921	2.673	0.2781	0.6299	0.9939
0,5	0.02132	8.246	0.9754	0.4703	1.077	0.9893	2.667	0.5165	0.5638	0.9905

Figura 3. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN913SH nas soluções.

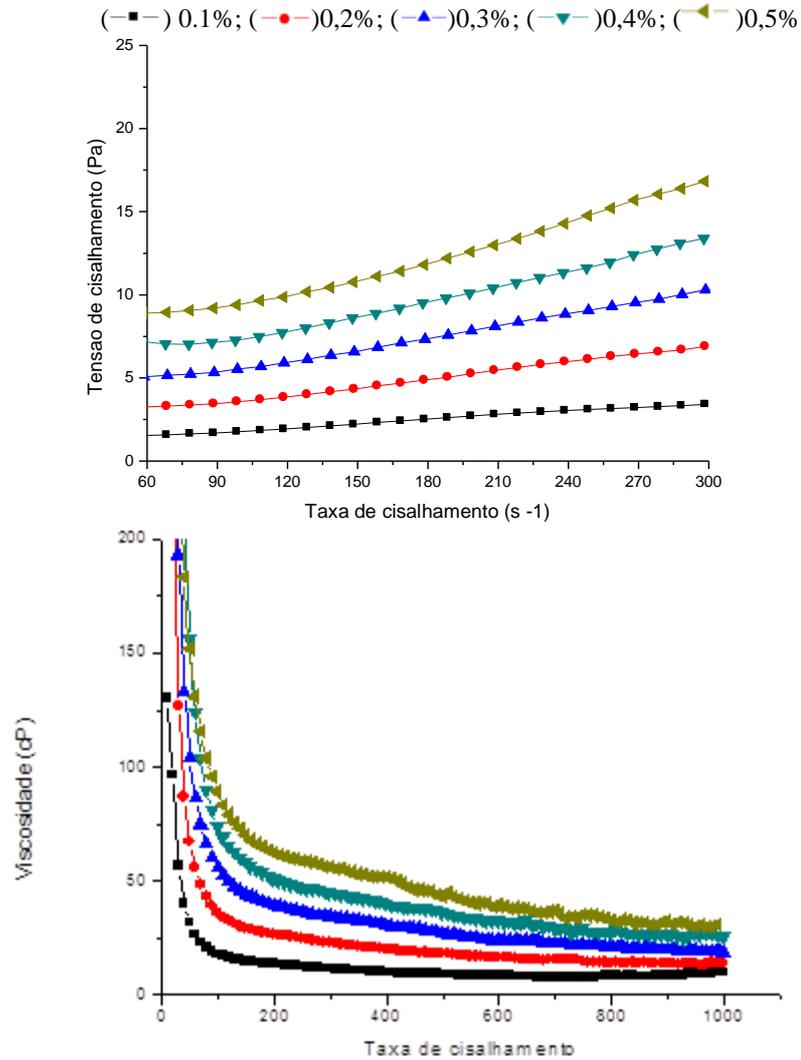


Tabela 3. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN913SH.

AN 913 SH (%)	Modelo de Bingham			Modelo de Ostwald de Waale			Modelo de Herschell-Buckley			
	Parâmetros		Coefic. Linear R	Parâmetros		Coefic. Linear R	Parâmetros			Coefic. Linear R
	$\mu_p$	$\tau_L$	R	n	k	R	$\tau_0$	k	n	R
0,1	0.00726	1.042	0.9757	0.7691	0.04013	0.9625	1.83	0.0002796	1.466	0.9821
0,2	0.01058	3.244	0.9887	0.5367	0.3204	0.9898	1.898	0.07531	0.7274	0.9937
0,3	0.01492	5.241	0.9821	0.4995	0.6025	0.9898	2.34	0.2082	0.6369	0.9922
0,4	0.01907	7.209	0.9769	0.4855	0.8645	0.9701	5.393	0.09202	0.7805	0.9804
0,5	0.02247	9.223	0.9718	0.4584	1.254	0.9828	3.96	0.4382	0.5926	0.9853

Figura 4. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN923SH nas soluções.

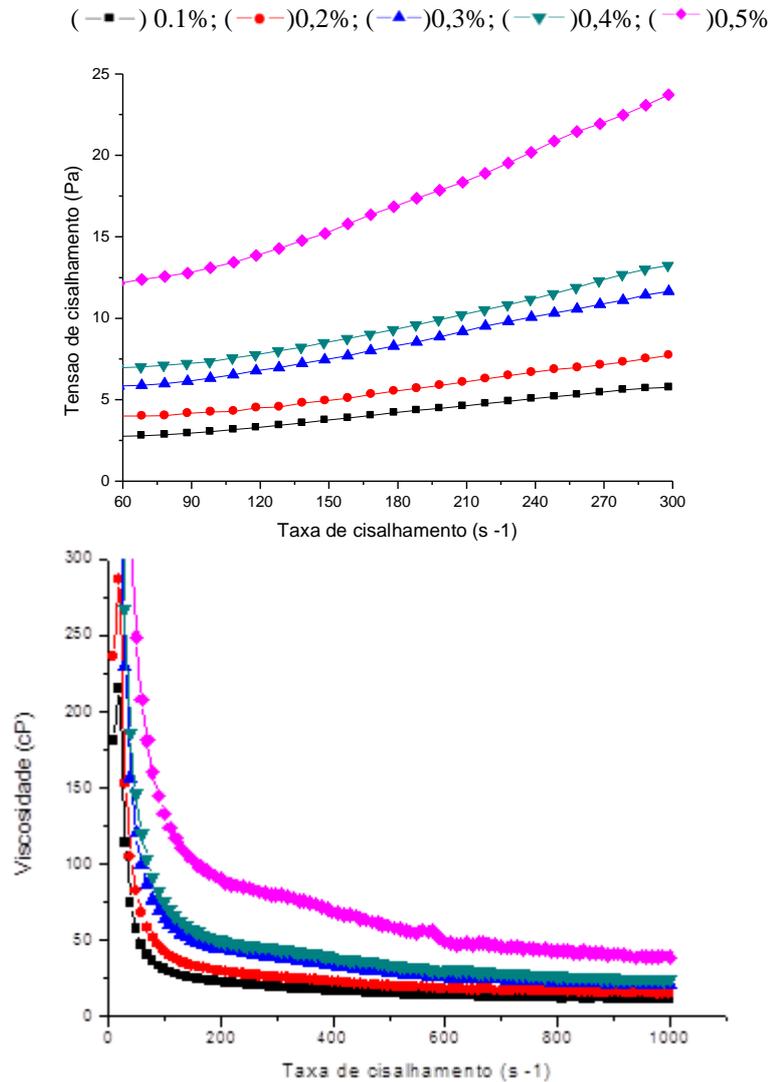


Tabela 4. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN923SH.

AN 923 SH (%)	Modelo de Bingham		Coefic. Linear R	Modelo de Ostwald de Waale		Coefic. Linear R	Modelo de Herschell- Buckley			Coefic. Linear R
	Parâmetros $\mu_p$	$\tau_L$		Parâmetros n	k		Parâmetros $\tau_0$	k	n	
0,1	0.008719	2.801	0.989	0.5251	0.2891	0.9893	1.715	0.06015	0.7317	0.9939
0,2	0.01182	3.741	0.9905	0.5303	0.3769	0.9886	2.489	0.06519	0.7623	0.9942
0,3	0.01566	6.058	0.9824	0.4737	0.7736	0.9877	3.174	0.2005	0.6482	0.9913
0,4	0.01809	6.954	0.9807	0.4747	0.8858	0.987	3.506	0.247	0.6396	0.9906
0,5	0.02729	13.48	0.96	0.4093	2.258	0.9809	4.018	1.13	0.495	0.982

Figura 5. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN926SH nas soluções.

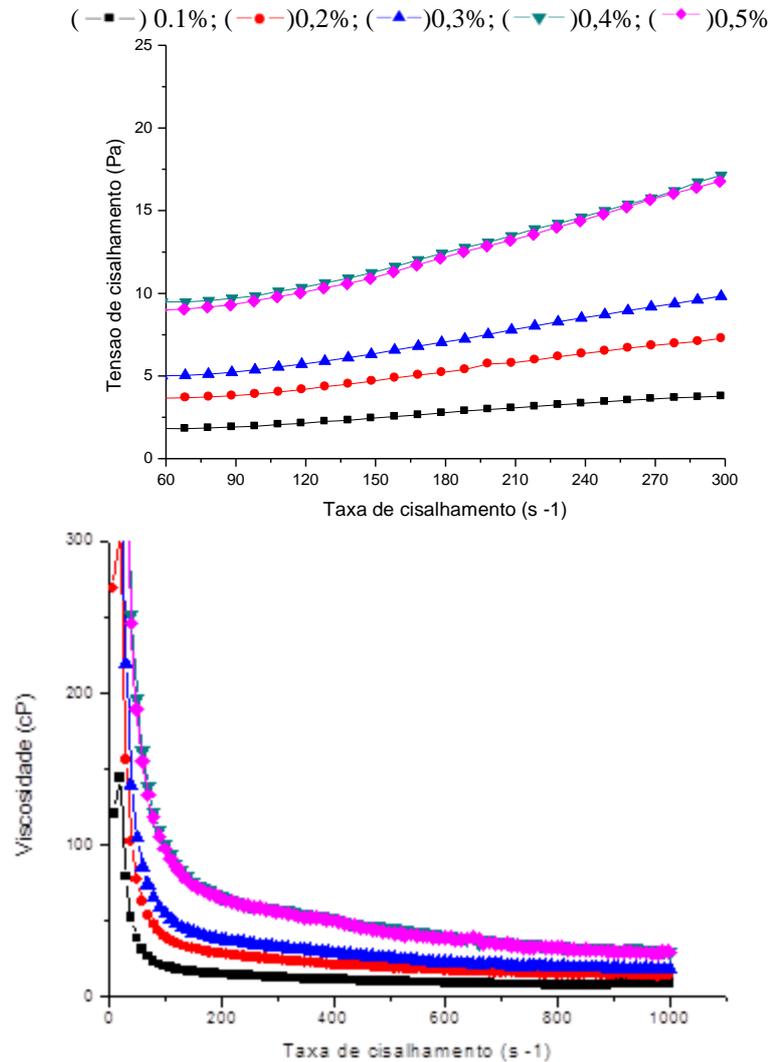


Tabela 5. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN926SH.

AN 926 SH (%)	Modelo de Bingham Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Ostwald de Waale Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Herschell-Buckley Parâmetros			Coefic. Linear R
	$\mu_P$	$\tau_L$		n	k		$\tau_0$	k	n	
0,1	0.006505	1.625	0.9829	0.6029	0.1204	0.9706	1.671	0.005604	1.021	0.983
0,2	0.01068	3.683	0.9866	0.5073	0.4071	0.9854	2.394	0.07051	0.7377	0.9913
0,3	0.01372	5.157	0.9821	0.4836	0.6288	0.9826	3.209	0.1152	0.705	0.9883
0,4	0.02186	9.706	0.9724	0.4385	1.431	0.9813	4.817	0.3922	0.6035	0.985
0,5	0.0208	9.528	0.9694	0.4291	1.466	0.98	4.531	0.4286	0.5851	0.9836

Figura 6. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN945SH nas soluções.

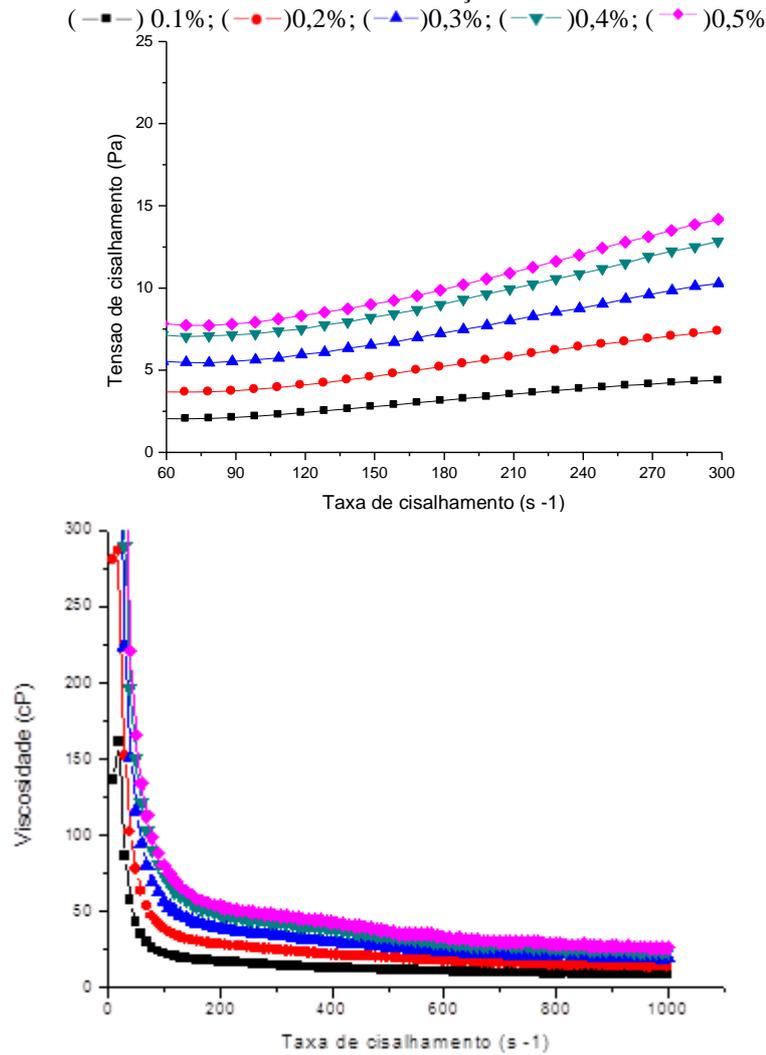


Tabela 6. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN945SH.

AN 945 SH (%)	Modelo de Bingham Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Ostwald de Waale Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Herschell-Buckley Parâmetros			Coefic. Linear R
	$\mu_p$	$\tau_L$		n	k		$\tau_0$	k	n	
0,1	0.00658	2.154	0.9856	0.5189	0.2286	0.9903	1.086	0.06784	0.6774	0.9932
0,2	0.0105	3.778	0.9831	0.4945	0.4414	0.9875	2.024	0.1137	0.6708	0.9913
0,3	0.01444	5.362	0.9837	0.4879	0.6405	0.9826	3.498	0.1048	0.7249	0.9891
0,4	0.01766	6.905	0.9791	0.4733	0.8776	0.9797	4.315	0.1557	0.6985	0.9858
0,5	0.0193	7.758	0.975	0.4667	1.012	0.9747	4.99	0.1643	0.7032	0.9816

Figura 7. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN956SH nas soluções.

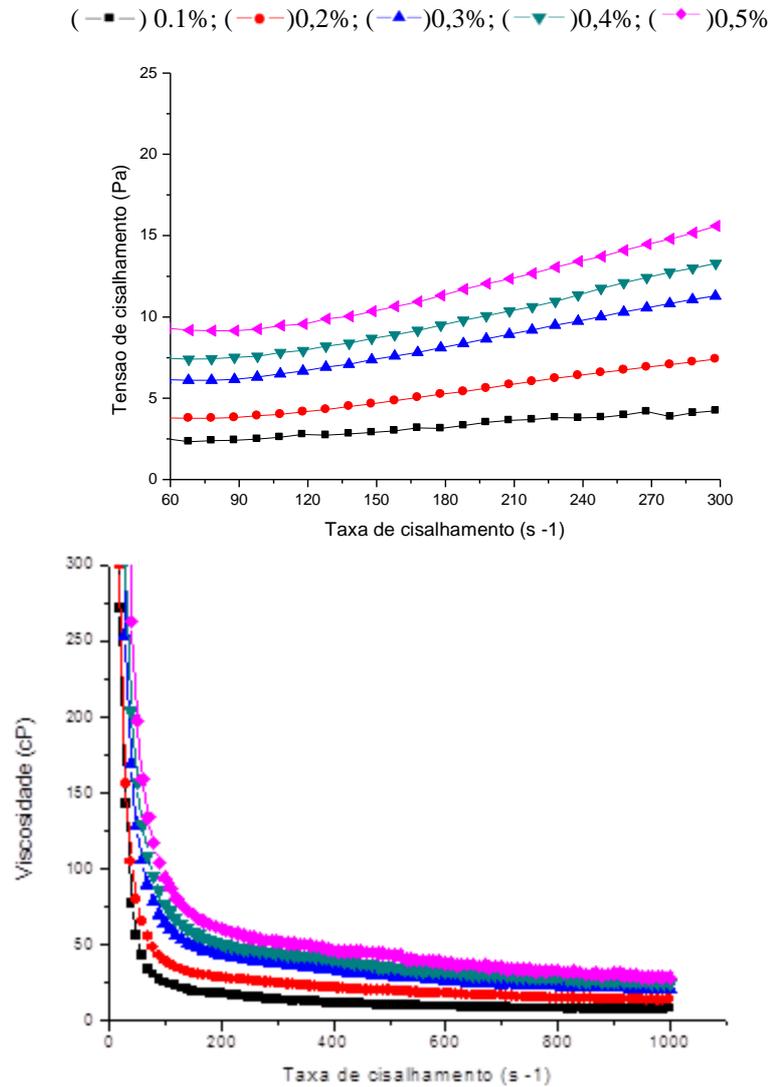


Tabela 7. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN956SH.

AN 956 SH (%)	Modelo de Bingham Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Ostwald de Waale Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Herschell-Buckley Parâmetros			Coefic. Linear R
	$\mu_P$	$\tau_L$		n	k		$\tau_0$	k	n	
0,1	0.005042	2.559	0.9753	0.41	0.4184	0.9308	2.632	0.003682	1.044	0.9754
0,2	0.01051	3.832	0.982	0.4904	0.456	0.9867	2.038	0.1187	0.665	0.9908
0,3	0.0158	6.056	0.9814	0.4773	0.7596	0.9832	3.6	0.154	0.6848	0.9889
0,4	0.01916	7.115	0.9804	0.4861	0.8604	0.9823	4.209	0.1787	0.6907	0.9876
0,5	0.0214	8.972	0.972	0.4567	1.217	0.9696	6.093	0.165	0.7167	0.9782

Figura 8. Curvas de fluxo (A) e viscosidade (B) em função da taxa de cisalhamento e da concentração de AN977SH nas soluções.

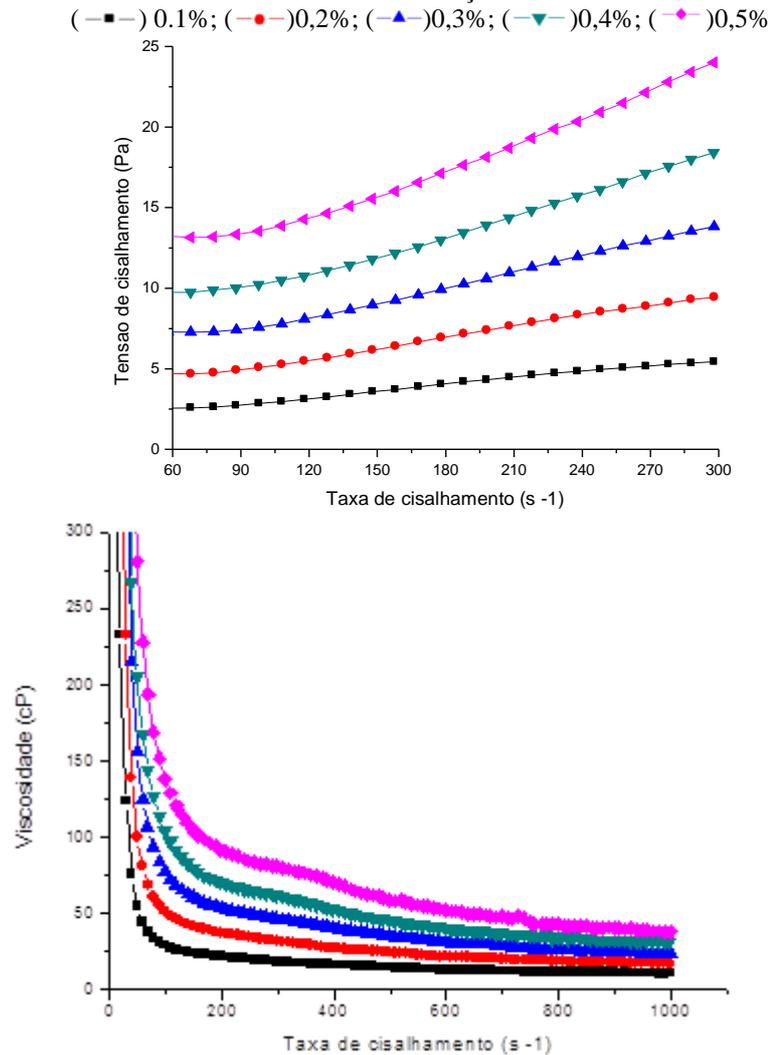


Tabela 8. Modelagem matemática com os valores dos coeficientes lineares e parâmetros dos modelos de Bingham, Ostwald de Waale e de Herschell-Buckley para as soluções preparadas com AN977SH.

AN 977 SH (%)	Modelo de Bingham Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Ostwald de Waale Parâmetros		Coefic. Linear R	Modelo de Herschell-Buckley Parâmetros			Coefic. Linear R
	$\mu_P$	$\tau_L$		n	k		$\tau_0$	k	n	
0,1	0.008189	2.78	0.987	0.5119	0.3012	0.9864	1.762	0.05658	0.7314	0.9923
0,2	0.01268	5.096	0.9793	0.4655	0.6698	0.9798	3.19	0.1166	0.6927	0.9863
0,3	0.01696	7.933	0.9661	0.4247	1.24	0.9721	4.442	0.264	0.6222	0.9776
0,4	0.022	10.28	0.9709	0.4235	1.621	0.9803	5.099	0.4382	0.5895	0.9841
0,5	0.02584	14.47	0.949	0.3781	2.766	0.967	6.185	0.9221	0.5139	0.9701

Figura 9. Curvas de fluxo em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,1% para todos os polímeros

(—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

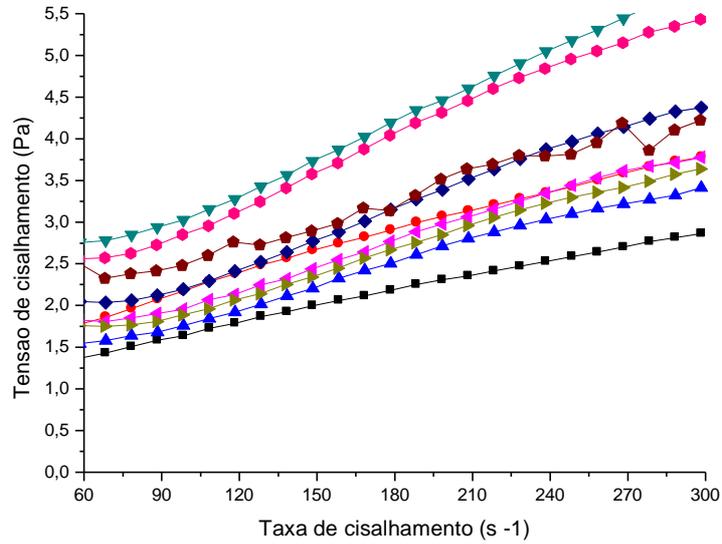


Figura 10. Curvas de fluxo em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,2% para todos os polímeros

(—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

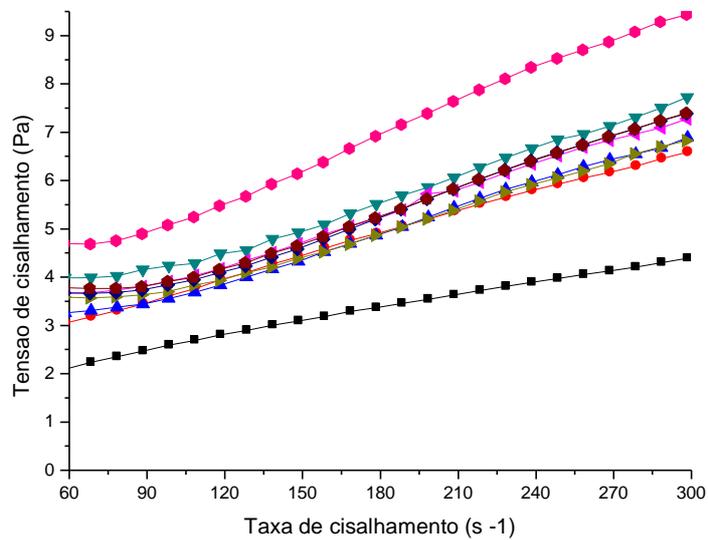


Figura 11. Curvas de fluxo em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,4% para todos os polímeros  
 (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

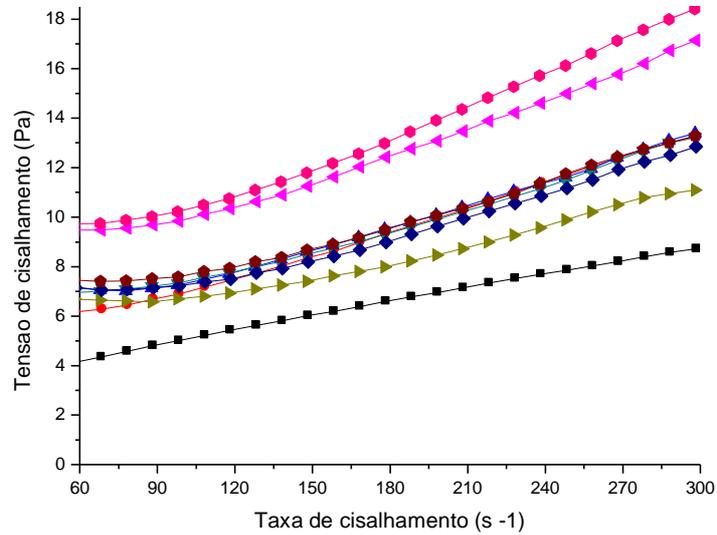


Figura 12. Curvas de fluxo em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,5% para todos os polímeros  
 (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

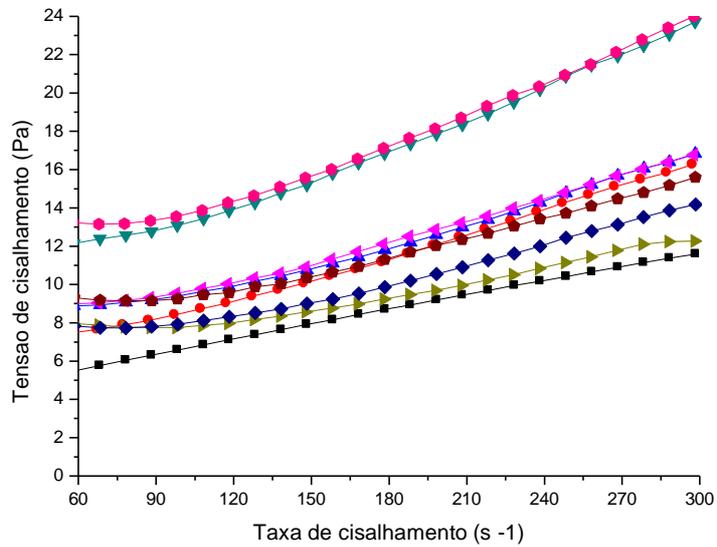


Figura 13. Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,1% para todos os polímeros  
 (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

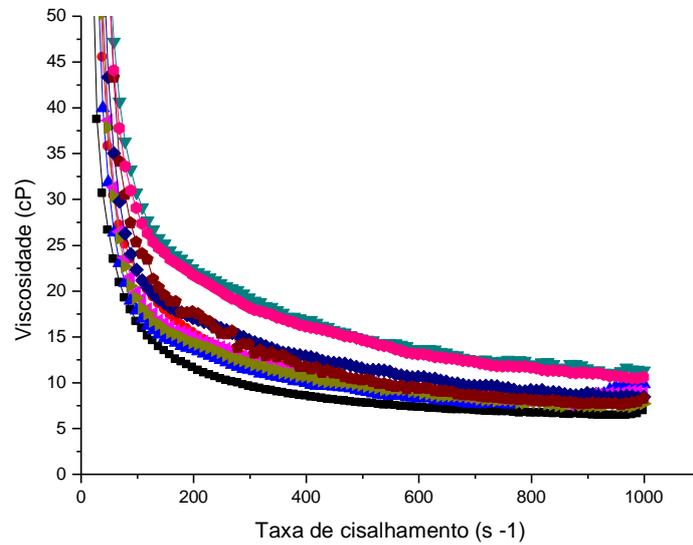


Figura 14. Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,2% para todos os polímeros  
 (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

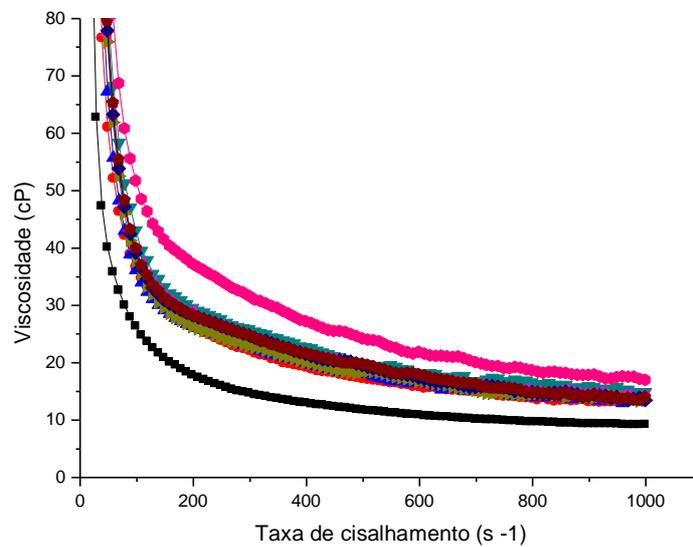


Figura 15. Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,4% para todos os polímeros  
 (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

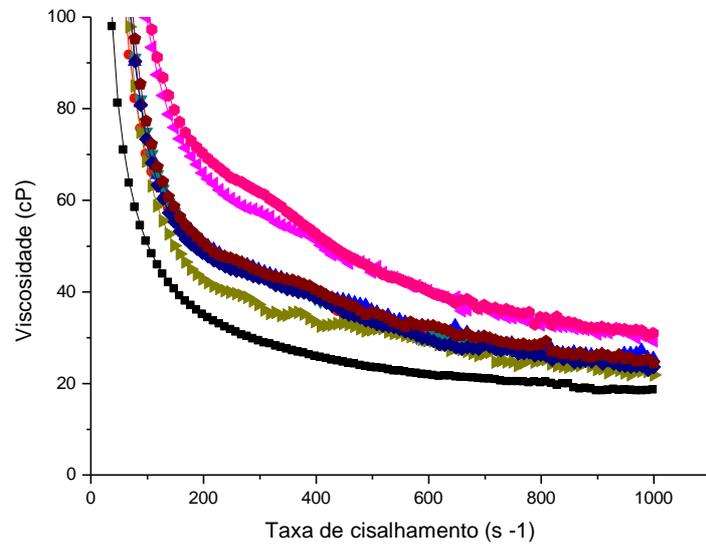


Figura 16. Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ) para a concentração de 0,5% para todos os polímeros  
 (—■—) AN 905 SH; (—●—) AN 910 SH; (—▲—) AN 913 SH; (—▼—) AN 923 SH; (—◆—) AN 926 SH; (—►—) AN 934 SH; (—◆—) AN 945 SH; (—■—) AN 956 SH; (—◆—) AN 977 SH;

