



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
Graduação em Engenharia Química



**ESCOAMENTO DE SOLUÇÃO NÃO-NEWTONIANA EM MEIO POROSOS A
ALTAS PRESSÕES**

Thiago Spessoto Pimenta Pucci

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca

Uberlândia - MG

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
Graduação em Engenharia Química



**ESCOAMENTO DE SOLUÇÃO NÃO-NEWTONIANA EM MEIO POROSO A
ALTAS PRESSÕES**

Thiago Spessoto Pimenta Pucci

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca
Nara Brandão Costa Santos

**Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários para a
aprovação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso do curso de Engenharia
Química.**

Uberlândia - MG

2018

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a música, a toda minha família, amigos, professores e a Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de contribuir um pouco para a Engenharia Química depois de anos de estudo, dedicação e muita aprendizagem.

Agradeço aos meus pais Bernardino Pucci Neto, Ana Luisa Spessoto Pimenta Pucci, meus avós e a toda minha família que, com muito carinho, proporcionaram as melhores condições para meu desenvolvimento.

Agradeço aos professores que dedicam a vida à nobre missão de construir nos outros a capacidade de se superarem, desenvolverem e aprenderem. Em especial ao Professor Fábio Arouca pela confiança, oportunidade e amizade.

Agradeço à doutoranda Nara Brandão Costa Santos pela contribuição, pela orientação, disponibilidade, por acompanhar meu trabalho de perto com auxílio necessário e pela amizade.

Agradeço a todos os amigos de república que me fortalecem dia a dia, em especial, ao grande amigo Igor Dias de Assis que está sempre ao meu lado.

À todos que amo, muito obrigado.

“Nada a temer se não o correr da luta”

Milton Nascimento

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	- 1 -
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	- 2 -
2.1 Fluidos.....	5
2.1.1 Fluidos newtonianos.....	5
2.2 Goma Xantana.....	10
2.3 Filtração.....	12
3.METODOLOGIA	- 23 -
3.1 Permeametria.....	19
3.2 Reologia	26
4.RESULTADOS	- 32 -
4.1 Permeametria.....	28
4.2 Reologia	32
5.CONCLUSÃO	- 41 -
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 42 -

RESUMO

A crescente demanda por energia e materiais plásticos impulsionam as pesquisas para desenvolvimento tecnológico das técnicas de obtenção de petróleo. O processo de perfuração de poços de petróleo é uma etapa complexa da extração do óleo fóssil e exige desenvolvimento tecnológico avançado. Na perfuração faz-se necessário uso de um fluido de perfuração a fim de carrear os cascalhos para a superfície do poço, manter a estabilidade das paredes do poço e controle hidrostático.

O fluido de perfuração deve ter comportamento reológico pseudoplástico para atender a todas suas funções designadas, apresentando baixa resistência ao escoamento quando submetido a altas taxas de deformação, facilitando o bombeamento e economizando energia, porém apresentando estruturas gelificadas quando em repouso, evitando sedimentação e mantendo os sólidos carregados em suspensão. A fim de garantir tal propriedade pseudoplástica à lama de perfuração, um dos componentes na formulação da lama é a goma xantana (GX), resíduo biológico da bactéria *Xanthomonas Campestris* com propriedades reológicas exclusivas, apresentando-se como viscosificante e emulsionante.

A operação de perfuração de poços opera em *overbalanced*, condição de pressão maior que a pressão do poço, o que gera escoamento da lama de perfuração no sentido das rochas porosas nas quais as lamas percolam. No intuito de melhor compreender o escoamento da lama em meios porosos, desenvolve-se nesse trabalho ensaios de permeamtria escoando água destilada e solução aquosa de goma xantana 0,2% v/v para cálculo da permeabilidade do meio poroso e ensaios reológicos na solução de GX antes e depois do escoamento para análise de mudanças nas propriedades reológicas durante o escoamento.

São esperados valores de k (permeabilidade) do meio poroso iguais para os ensaios com água e GX, uma vez que a permeabilidade é uma propriedade dependente apenas das características do meio poroso independentemente do fluido por ele percolado. No entanto, obtém-se valores de k menores nos ensaios escoando a solução de GX do que nos ensaios utilizando água destilada. Também, nota-se que a solução de GX antes do escoamento apresenta comportamento pseudoplástico mais acentuado do que depois de escoar através do meio poroso, com viscosidades aparentes maiores para mesmas taxas de deformação.

Conclui-se que a goma xantana, ao escoar através do meio poroso apresenta retenção de parte do seu material viscoso formando uma fina camada gelatinosa na superfície da membrana porosa, dificultando o escoamento, explicando as diferenças nos valores de k calculados e nas propriedades reológicas da solução de GX antes e depois do escoamento.

ABSTRACT

The demand for energy and plastic materials boosted the development of oil-seeking techniques. The process of drilling oil wells is a complex step in the extraction of the fossil fuel oil and advanced technological development is required. In drilling it is necessary to use a drilling plane to fix the panels to the well surface, maintaining a position of the well walls and hydrostatic control.

The drilling fluid must have a pseudoplastic rheological behavior to meet all its designated functions, presenting low resistance to flow when subjected to high deformation rates, facilitating pumping and saving energy, but presenting gelled structures when at rest, avoiding sedimentation and keeping the suspended solids. In order to guarantee such pseudoplastic property to the drilling mud, one of the components in the mud formulation is xanthan gum (XG), biological residue of the *Xanthomonas Campestris* bacterium with exclusive rheological properties, presenting itself as a viscosifier and emulsifier.

The well drilling operation operates on overbalanced, pressure condition greater than the well pressure, which generates run off from the drilling mud towards the porous rocks in which the sludge percolates. In order to better understand the flow of the sludge in porous media, it is developed in this work permeate tests by discharging distilled water and aqueous solution of xanthan gum 0.2% v / v to calculate the permeability of the porous medium and rheological tests in the solution of XG before and after the runoff to analyze changes in rheological properties during runoff.

Equivalent k (permeability) values of the porous medium are expected for the water and GX assays, since permeability is a property dependent only on the characteristics of the porous medium regardless of the fluid percolated thereto. However, smaller k values are obtained in the assays by draining the XG solution than in the assays using distilled water. Also, it is noted that the solution of XG before the flow exhibits more pronounced pseudoplastic behavior than after flow through the porous medium, with apparent viscosities greater for the same deformation rates.

It is concluded that xanthan gum, when flowing through the porous medium, retains some of its viscous material forming a thin gelatinous layer on the surface of the porous membrane, making it difficult to flow, explaining the differences in the calculated k values and the rheological properties of the XG solution before and after the flow

1. INTRODUÇÃO

No contexto atual nacional existe uma crescente demanda por energia. Hoje a maior parte do transporte interno de produtos no Brasil é feito por caminhões que utilizam motores a combustão de derivados do petróleo e pneus de borracha derivada também do óleo fóssil, fato que se mostra um dentre vários exemplos do vasto consumo de derivados de petróleo no país. A maior parte da matriz energética mundial e brasileira é constituída por recursos não renováveis, sendo destes a maior parte advinda do petróleo, segundo a Resenha Energética Brasileira, elaborada pelo Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, vinculado ao Ministério de Minas e Energia (2016). A Figura 1.1 ilustra a oferta interna de energia nacional referente ao ano de 2015, os valores apresentados estão em porcentagem.

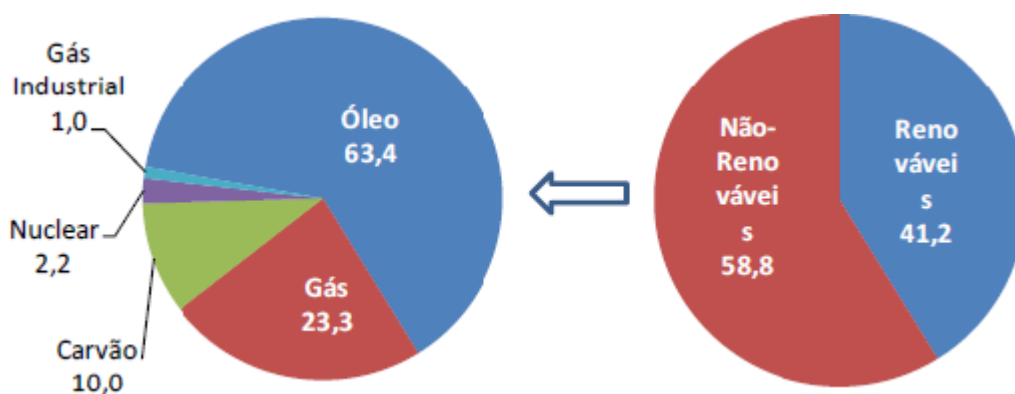


Figura 1.1 – Oferta Interna de Energia no Brasil – 2015. Adaptado de Resenha Energética Brasileira (2016).

Também atrelado ao contexto petrolífero mostra-se crescente a demanda por materiais inovadores com propriedades plásticas únicas de derivados do petróleo. Nesse contexto, e especialmente no cenário brasileiro, vários investimentos tecnológicos estão sendo implantados com o intuito de otimizar a exploração e transformação do petróleo, processos que mostram muitos desafios tecnológicos, o que posiciona o país como uma figura importante no panorama energético. De acordo com o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustível na publicação da Agenda Prioritária da Indústria de Petróleo, Gás e Biocombustíveis 2014-2015, o setor de Exploração e Produção atrai a maior parte de investimentos, destacando-se dentre as etapas de exploração a perfuração como responsável por grande parte dos gastos.

No processo de perfuração de poços de petróleo o controle da estabilidade das paredes

dos poços é crucial para o sucesso da operação. Segundo COMMITTEE (2005), com a finalidade de controle da pressão hidrostática do poço, manter a estabilidade das paredes do poço, transportar cascalhos para a superfície bem como mantê-los em suspensão no caso de paradas operacionais, lubrificar e resfriar a broca, além de reduzir a perda de filtrado para o reservatório, utiliza-se durante a perfuração de poços fluidos de perfuração (ou lamas de perfuração). As lamas de perfuração são constituídas por fluidos e sólidos, estrategicamente selecionados a fim de conseguir vencer o desafio de formular uma solução que consiga suprimir todas as funções esperadas. A base fluida pode ser aquosa, aerada, oleosa, sintética, ou uma mistura delas. Em geral, o fluido é bombeado por dentro da broca e retorna para a superfície pelo espaço anular entre a broca e as paredes do poço, vide Figura 1.2. Em concordância com Thomas (2001), tais lamas podem ter características de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, a depender do estado físico e seus componentes, e sua formulação é específica para as condições operacionais de perfuração de cada poço de exploração.

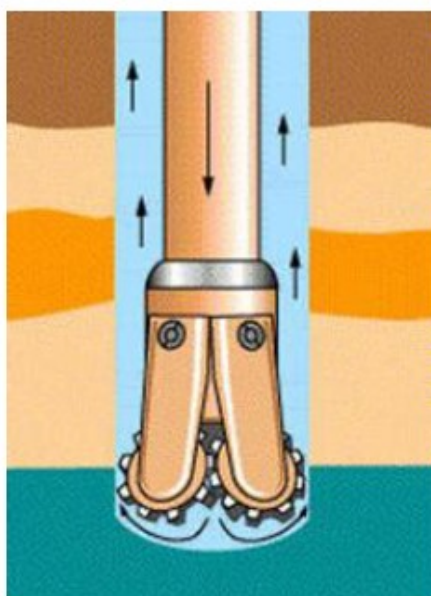


Figura 1.2 – Escoamento do fluido de perfuração (ELER, 2012).

Durante as operações de perfuração a lama escoar sob elevadas taxas de deformação, nessas condições visa-se fluidos com propriedades a facilitar o escoamento e bombeamento do mesmo, tal qual o carreamento dos sólidos provenientes da trituração das rochas (cascalhos), tornando interessante a redução da viscosidade aparente do fluido sob elevadas taxas de deformação. Por outro lado, em situações em que a circulação é cessada, é necessário que o fluido seja capaz de minimizar a sedimentação dos seus próprios sólidos

constituintes e dos perfurados, evitando que ocorra o aprisionamento e aumento excessivo do torque da broca no retorno operacional do sistema, em outras palavras, em paradas operacionais é necessário aumento da viscosidade aparente. Considerando ambas as situações, vê-se que uma das principais propriedades dos fluidos de perfuração é a pseudoplasticidade (SKALLE, 2011).

Um dos componentes amplamente utilizados na formulação de lamas de perfuração é a goma xantana (GX), um polissacarídeo microbiano produzido por linhagens de *Xanthomonas campestris*, que em soluções, mesmo que pouco concentradas, apresenta comportamento pseudoplástico essencial para o sucesso da perfuração de poços. A GX é utilizada no ramo alimentício por sua propriedade viscosificante, dando aspecto cremoso a alimentos como iogurtes, sucos e molhos. Também é utilizada em receitas de bolos e pães a fim de substituir farinhas e atender necessidades de produtos sem glúten para alérgicos. É também amplamente utilizada na indústria de cosméticos e de petróleo, como será abordado no Capítulo 2 desse trabalho (Brandão, 2010).

O sistema de perfuração trabalha em *overbalanced* em relação ao reservatório, que caracteriza uma diferença de pressão entre os mesmos, sendo a pressão do sistema de perfuração a maior, garantindo segurança e estabilidade para a operação. Tal diferença de pressão gera um escoamento no sentido das paredes do poço, onde o fluido tende a permear pelos poros da rocha caracterizando um processo de filtração, no qual o fluido passante é denominado filtrado e seus sólidos constituintes e não permeáveis formam a torta de filtração ou reboco externo. Existe a necessidade de monitorar durante a perfuração a taxa de filtrado e a espessura do reboco (PETROBRAS, 2011).

Tal filtração é necessária pois o reboco ajuda a manter a estabilidade das paredes do poço, não obstante deve ser conhecida e controlada pois acarreta em contaminação do óleo de interesse e do meio ambiente, perda de lama, entupimento dos poros das rochas e diminuição da produtividade do poço, (PETROBRAS, 2011) motivando o trabalho em questão.

Nessas conjunturas, ensaios laboratoriais de avaliação da permeabilidade em meios porosos e de reologia são importantes contribuições para o entendimento dessas variáveis e suas interpretações na etapa de perfuração de poços de petróleo e gás. Foi escolhida nesse trabalho a Goma Xantana como fluido pseudoplástico para testes de escoamento no meio poroso, por ser uma alternativa relativamente barata, de fácil e simples preparo, propriedades reológicas adequadas e por ser um dos componentes dos fluidos de perfuração.

Dessa forma, esse trabalho procura melhor compreender essa filtração através da medição experimental da permeabilidade de meios porosos e as características reológicas de fluidos não-newtonianos pseudoplásticos em diversas condições operacionais de escoamento.

Para isso, foram analisados o escoamento de dois diferentes fluidos (água e goma xantana), com três volumes diferentes cada, em seis pressões diferentes, em meio poroso, acompanhado de análises reológicas antes e depois do escoamento, com o objetivo geral de:

- caracterizar o escoamento de goma xantana em meio poroso;

e os objetivos específicos de:

- calcular a permeabilidade do meio poroso percorrido por água e o fluido pseudoplástico (Goma Xantana 0,2% v/v);

- analisar o perfil de viscosidade da solução de goma xantana ao percolar o meio poroso.

O conteúdo do trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução, o segundo a revisão bibliográfica abordando reologia de fluidos, a Goma Xantana e filtração. No capítulo três são descritas as metodologias empregadas na realização dos ensaios experimentais, seguidos dos resultados e discussões obtidos apresentados no quarto capítulo. Por fim, no quinto capítulo são expostas as conclusões sobre o trabalho aplicado aos dados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse tópico serão abordados os conhecimentos sobre fluidos e reologia necessários para melhor compreensão dos fluidos de perfuração e suas propriedades, tal qual as possíveis mudanças nessas propriedades antes e depois da filtração. Também, serão abordados conhecimentos teóricos sobre filtração e escoamento em meios porosos e as informações necessárias para conhecimento da goma xantana.

2.1 Fluidos

Fluidos são substâncias que se deformam continuamente quando submetidas a uma força tangencial cisalhante. (Wilkes, 2006). Segundo Machado (2002), o cisalhamento é definido em termos de taxa de deformação, que corresponde a uma mudança na velocidade de um fluxo em relação a uma distância ortogonal a direção do fluxo.

Segundo Wilkes (2006) existe, além da magnitude da força aplicada sobre um fluido, outra propriedade que define a taxa com a qual os fluidos se deformam, sendo essa uma propriedade do próprio fluido chamada viscosidade, sendo definida como a resistência à deformação ou ao escoamento.

Dessa maneira, Fox e McDonald (2001), sobre tal comparação, suscitam que os sólidos são elásticos e os fluidos são viscosos, ao passo que materiais que combinam características de sólidos e fluidos denominam-se viscoelásticos.

O estudo da reologia, ramo da física que estuda a deformação e fluxo da matéria, estabelece relações entre tensões de cisalhamento e taxas de deformação dos fluidos, a fim de caracteriza-los e classifica-los, como demonstrado na Figura 2.1 e nos seguintes subitens do trabalho.

2.1.1 Fluidos newtonianos

De acordo com Machado (2002), um fluido é classificado como newtoniano quando há uma direta proporcionalidade entre a taxa de deformação e a tensão cisalhante sobre ele aplicada, em que a constante de proporcionalidade entre essas duas grandezas é a viscosidade. Um fluido newtoniano é aquele que apresenta viscosidade constante perante as variações da taxa de deformação e do tempo.

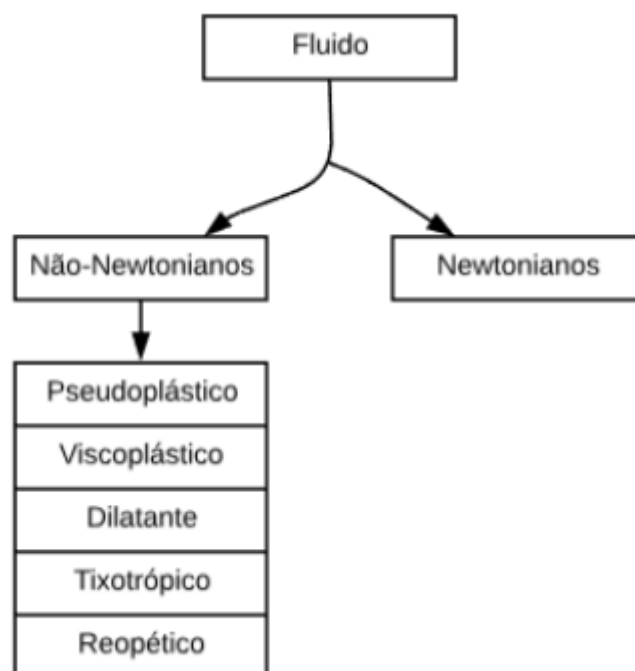


Figura 2.1 – Classificação dos tipos de fluido. Adaptado de Santos (2017).

Tal relação entre a tensão (τ_{yx}) e a taxa de cisalhamento (γ_{yx}) pode ser expressa matematicamente pela Equação (2.1) para o escoamento unidirecional, no qual a velocidade (V_x) apresenta apenas o componente x variando na direção y .

$$\tau_{yx} = \mu \left(- \frac{dV_x}{dy} \right) = \mu \gamma_{yx} = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

A constante de proporcionalidade μ é denominada viscosidade dinâmica newtoniana, dependendo somente do tipo de fluido, temperatura e pressão. Corresponde a inclinação da reta do gráfico de tensão cisalhante em função da taxa de deformação. A taxa, γ_{yx} , é expressa pelo gradiente de velocidade (V_x) na direção perpendicular ao escoamento, $\frac{dV_x}{dy}$. O sinal negativo significa a resistência do fluido ao movimento e A a área de aplicação da força F .

2.1.1 Fluidos não-newtonianos

Analogamente à definição de fluidos newtonianos, fluidos não-newtonianos são aqueles com propriedades tais quais não apresentam direta proporcionalidade quando relacionadas

tensão de cisalhamento e taxas de deformação. Evidentemente tal ausência de proporcionalidade direta pode se apresentar de diferentes formas, justificando as classificações de tipos de fluidos apresentadas na Figura 2.1. Classifica-se os tipos de fluidos conforme o aspecto da curva de fluxo, a dependência ou não com o tempo e como são descritos por modelos matemáticos.

No caso de fluidos não-newtonianos a viscosidade não se trata mais de uma propriedade constante em determinadas temperatura e pressão, sendo tratada aqui como viscosidade aparente, η , dependendo da geometria do escoamento e taxa de deformação, segundo Chhabra e Richardson (2008).

Esses fluidos são agrupados em três grandes grupos, como sugerem Chhabra e Richardson (2008): fluidos independentes do tempo ou inelásticos: a taxa de deformação em um ponto só pode ser determinada de posse do valor da tensão de cisalhamento nesse mesmo ponto e instante; fluidos dependentes do tempo: a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação depende da duração do cisalhamento e do efeito de memória do fluido; fluidos viscoelásticos: exibem características de um fluido ideal e sólidos elásticos, assim, apresentam uma recuperação parcial elástica quando suspensa a tensão a que estão submetidos.

Nos seguintes subitens desse capítulo serão descritos cada um desses grandes grupos de classificação reológica, abrangendo descrições de suas principais características, propriedades e comportamentos.

a) Fluidos independentes do tempo

Fluidos independentes do tempo são aqueles cujas propriedades reológicas independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, sendo assim, possuem uma taxa de cisalhamento em função, exclusivamente, da tensão aplicada no ponto de estudo. (CHHABRA E RICHARDSON, 2008). A Figura 2.3 ilustra o comportamento de fluidos independentes do tempo.

Os fluidos não-newtonianos independentes do tempo podem ser classificados em duas subdivisões: sem tensão inicial – são aqueles que não necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar. Compreendem a maior parte dos fluidos não newtonianos; e com tensão inicial – são os que necessitam de uma tensão de cisalhamentos

inicial para começarem a escoar (FOX E MCDONALD, 2001). Pode-se também classificar esses fluidos em três grupos: pseudoplásticos, viscoplásticos e dilatantes.

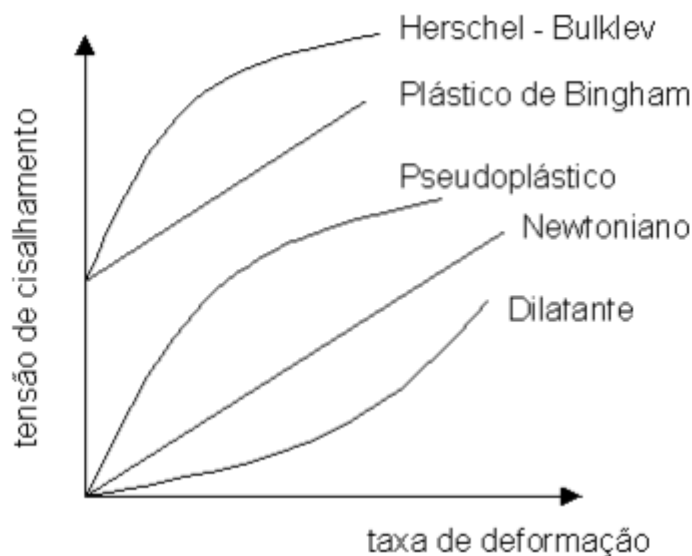


Figura 2.3 - Comportamento de fluidos independentes do tempo, adaptado de Fox e McDonald (2001).

(i) Fluidos dilatantes

São fluidos em que a viscosidade aparente cresce com aumento da taxa de deformação a que estão submetidos, ou seja, apresentam comportamento oposto aos fluidos pseudoplásticos (Vide item iii). Essa característica pode ser atribuída ao empacotamento das partículas no solvente dispersante, como proposto por Wilkes (2006) e Machado (2002). Exemplos de fluidos dilatantes: suspensões de amido, soluções de farinha de milho e açúcar, silicato de potássio e areia.

(ii) Fluidos viscoplásticos

Os fluidos viscoplásticos são aqueles que podem apresentar comportamento de sólidos elásticos ou de fluidos viscosos, a depender da tensão a eles aplicada. Segundo Wilkes (2006), tais fluidos são caracterizados pela existência de uma tensão mínima de cisalhamento, τ_0 , que deve ser excedida para que o fluido escoe. Aplicando no material viscoplástico tensões menores que τ_0 , o comportamento apresentado assemelha-se às características de sólidos elásticos, com uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente

para resistir a uma tensão cisalhante inferior a τ_0 quando em repouso. Porém, quando a tensão ultrapassa a tensão mínima, inicia-se o escoamento e as características de fluido viscoso apresentam-se. Uma vez excedida essa tensão, a curva de escoamento, tensão *versus* taxa de deformação, pode apresentar comportamento linear ou não linear, e não passa pelo ponto de origem (CHHABRA E RICHARDSON, 2008)

Após excedida a tensão mínima τ_0 , é determinada uma classificação desses fluidos em detrimento do seu comportamento viscoso. Se a curva de escoamento do fluido for linear, o fluido é denominado de Plástico de Bingham e a sua viscosidade plástica possui um valor constante; caso essa curva não seja linear, o fluido é chamado de visco-plástico e sua viscosidade pode aumentar ou diminuir com o aumento da taxa de deformação. (WILKES, 2006).

(iii) Fluidos pseudoplásticos

São fluidos em que a viscosidade aparente decresce com aumento da taxa de deformação a que estão submetidos. Especialmente, nesse trabalho, compõem a classificação de maior interesse de estudo uma vez que a maior parte dos fluidos de perfuração buscam atingir comportamento pseudoplástico, como veremos a seguir (WILKES, 2006).

Nos fluidos pseudoplásticos tem seu comportamento justificado pela irregularidade e a tendência à interação coulômbica das moléculas do fluido e das partículas nele dispersas. Quando em repouso, tais moléculas mantêm uma ordem interna irregular que os confere alta resistência ao escoamento, ou seja, elevada viscosidade. Em contraponto, ao iniciar a aplicação de uma taxa de cisalhamento nesse material, suas moléculas e partículas tendem a alinhar-se na direção do fluxo facilitando o deslizamento, diminuindo gradativamente a viscosidade a medida que a taxa de deformação aumenta, facilitando o escoamento (WILKES, 2006).

Os fluidos pseudoplásticos tem grande aplicação da indústria petrolífera. Sabe-se que na perfuração dos poços de petróleo os fluidos de perfuração devem apresentar baixa resistência ao escoamento, a fim de facilitar o carreamento dos cascalhos para a superfície, minimizar gastos energéticos e sobrecargas de bombas e otimizar a operação. Também, o mesmo fluido deve ser capaz de manter os cascalhos em suspensão, minimizando a sedimentação em casos de paradas operacionais, ou seja, em momentos de baixa tensão de

cisalhamento a viscosidade deve ser alta. Tais necessidades adequam os fluidos pseudoplásticos para a função de fluidos de perfuração.

b) Fluidos dependentes do tempo

Segundo Chhabra (2007) os fluidos dependentes do tempo são os quais possuem as propriedades do escoamento dependentes tanto da taxa de deformação quanto do tempo de duração do cisalhamento. Segundo Machado (2002), a mecânica dos fluidos classifica esses tipos de fluidos em tixotrópicos e reopéticos. Os fluidos tixotrópicos são aqueles que sob uma taxa de deformação constante tem a viscosidade aparente, ou a correspondente tensão cisalhante, diminuída com o tempo enquanto os fluidos reopéticos, por sua vez, são caracterizados pelo aumento da viscosidade quando cisalhados sob uma taxa de deformação constante (WILKES, 2006).

2.2 Goma Xantana

A goma xantana é um polissacarídeo microbiano produzido por linhagens de *Xanthomonas campestris*, essas bactérias apresentam células em forma de bastonetes, gram-negativas e ocorrem predominantemente isoladas, como ilustra a Figura 2.6. A primeira qualidade da GX vem das bactérias *Xanthomonas campestris*, uma vez que essas apresentam simples condições de cultivo, diminuindo custos de produção (BRANDÃO, 2010).

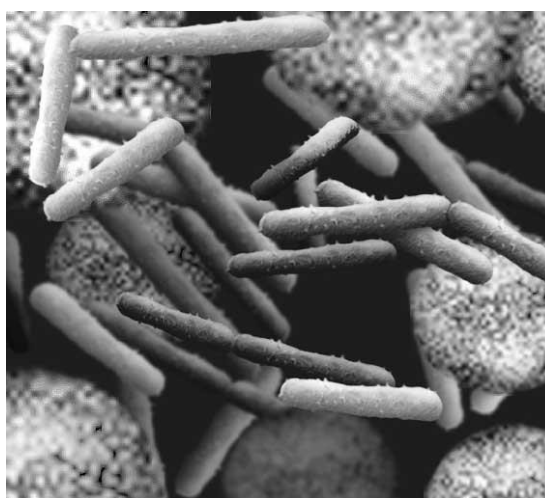


Figura 2.6 – Imagens microscópicas tridimensionais de *Xanthomonas campestris*.

A xantana é um polissacarídeo de elevado interesse industrial, principalmente para a indústria de alimentos, farmacêutica e petroquímica, devido as suas propriedades físico-químicas que superam as de todos os outros polissacarídeos disponíveis no mercado. Dentre estas propriedades destaca-se a elevada viscosidade em soluções aquosas em baixas concentrações (0,05-1%), devido à estrutura ramificada, como ilustrado na Figura 2.7, e alto peso molecular, sendo um polissacarídeo proveniente da união de n -monômeros de fórmula molecular $C_{35}H_{49}O_{29}$, bem como estabilidade em ampla faixa de temperatura e pH e comportamento pseudoplástico (Brandão, 2010).

Além dos efeitos pseudoplásticos, soluções de poliméricas podem apresentar comportamento tixotrópico que também é de grande interesse no ramo industrial, como exemplifica a indústria de cosméticos, no ramo de loções e xampus, facilitando a retirada do produto da embalagem, sem ocorrer escorrimento exagerado, e seu espalhamento durante a utilização (MOREIRA, 2002).

São utilizados majoritariamente amido de milho e beterraba como fonte de açúcares para a fermentação feita pela *Xanthomonas campestris*, porém projetos de pesquisa implementando fontes inovadoras de sacarídeos para tal fermentação fomentam estudos no Brasil e no mundo. Dentre as fontes alternativas de suprimentos para produção biológica de goma xantana destacam-se o soro de mandioca, soro de leite, amido de ervilha, caldo de cana de açúcar, resíduos de suco de maçã, casca de cacau e resíduos de suco de uva (Brandão, 2010).

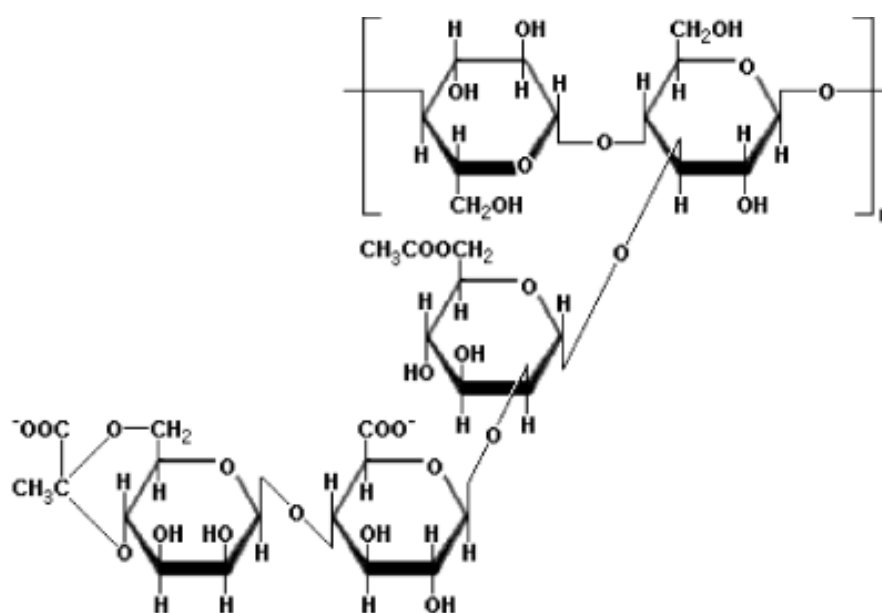


Figura 2.7 – Monômero do polissacarídeo goma xantana (NERY, 2009).

Identificada pela primeira vez na década de cinquenta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a *Xanthomonas campestris* teve sua primeira relação com a ciência como praga causadora da doença “podridão negra” nas folhas de plantações diversas e posteriormente começou a ser cultivada para produção de goma xantana. Atualmente no Brasil quase a totalidade da GX é importada e tem origem na glicose de milho, cenário que tende a mudar devido à crescente das pesquisas nacionais na área de produção do rico polissacarídeo microbiano (BRANDÃO, 2010).

A indústria petrolífera é uma das principais contribuintes no consumo de goma xantana, utilizada principalmente na composição dos fluidos de perfuração devido a sua alta viscosidade em baixas concentrações, alta contribuição para o comportamento pseudoplástico das lamas e estabilidade da viscosidade à salinidade, temperatura e condições alcalinas; de modo a apresentar fácil injeção. A goma entra na composição das lamas de perfuração como viscosificante, agente suspensivo, espessante, emulsionante e estabilizante (BRANDÃO, 2010).

Devido a essas propriedades da goma xantana atreladas ao baixo custo relativo, fácil preparo, manuseio e armazenamento em laboratório e proximidade das características reológicas em relação aos fluidos de perfuração, o polissacarídeo microbiano foi escolhido para compor os ensaios laboratoriais posteriormente descritos nesse trabalho.

2.3 Filtração

Filtração é uma operação unitária de separação fluido-sólido, na qual a mistura escoar em direção a um meio poroso com diâmetro de poro necessariamente menor que o diâmetro das partículas em suspensão, a mistura fluido-sólido ao chocar-se com o meio poroso sofre separação com o sólido sendo retido na região imediatamente anterior ao meio poroso enquanto o fluido percola os poros e segue escoando sem os sólidos em suspensão, como ilustra a Figura 2.8. O meio poroso é chamado de filtro ou meio filtrante, os sólidos retidos imediatamente antes do filtro constituem a torta ou reboco que se deforma continuamente durante o escoamento e o fluido que escoar através do meio filtrante é chamado filtrado (ALSABA, 2014).

O fenômeno da filtração ocorre quando uma solução contendo sólidos em suspensão é pressurizada contra um meio poroso de diâmetro de poro menor que o diâmetro das

partículas em suspensão, segundo Hwang, Chang e Chen (1996). Os componentes sólidos tendem a se depositar e se aderir na superfície do meio poroso exposta ao fluido, formando um filme. É essencial que o fluido tenha uma fração razoável de partículas com dimensões ligeiramente menores que as dimensões dos poros das rochas expostas, especificamente quando o assunto é perfusão de poço de petróleo promovendo maior estabilidade das paredes do poço nas etapas iniciais de escoamento. Quando existem partículas sólidas com dimensões adequadas, a obstrução dos poros é rápida e somente a fase líquida do fluido invade a rocha reservatório (ALSABA, 2014).

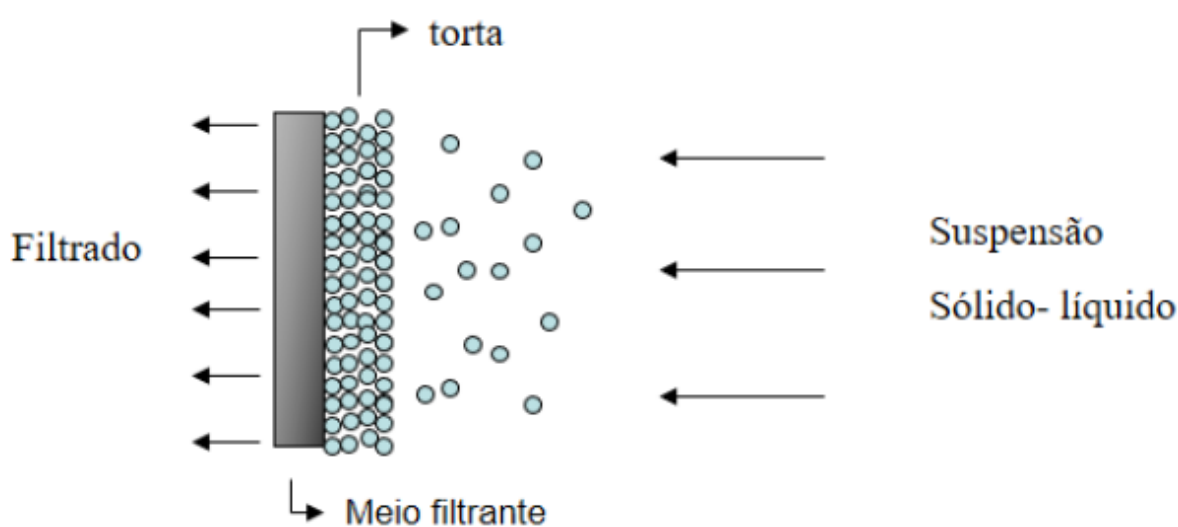


Figura 2.8 – Filtração: diagrama ilustrativo.

No início da operação o meio filtrante é responsável por reter as partículas sólidas. No decorrer da operação o acúmulo de sólidos aumenta e deforma a torta continuamente formando um outro meio poroso que retém os sólidos por si só. A Figura 2.9 ilustra esse processo, onde é fixado um eixo horizontal chamado *eixo x* com origem no final do meio filtrante, esse com espessura l_m , sendo t o tempo e $l(t)$ o comprimento da torta, que aumenta com o tempo (CARTER, 1957).

O meio filtrante pode ser deformável ou indeformável, sendo os deformáveis aqueles que possuem suas propriedades (permeabilidade, k , e porosidade, ε) variáveis com o tempo, sendo permeabilidade a medição de quanto um meio poroso é facilmente permeável e porosidade a fração volumétrica de poros no meio, enquanto os indeformáveis possuem propriedades fixas. Já a torta cresce e se deforma com o tempo e os sólidos que se acumulam

formam um novo meio filtrante que também possui permeabilidade, k , e porosidade, ε , sendo essas propriedades variáveis para a torta (ALSABA, 2014).

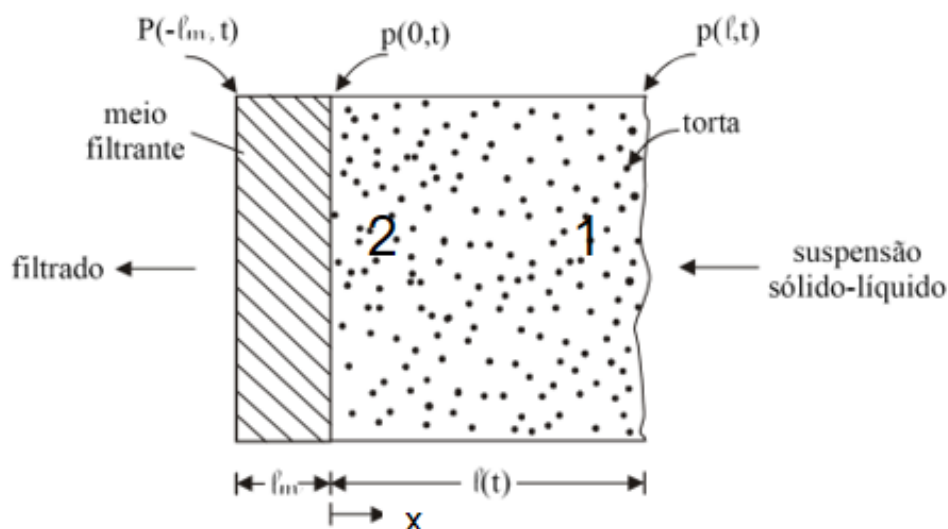


Figura 2.9 - Filtração: diagrama explicativo.

No ponto 2 da Figura 2.9 os sólidos já foram mais comprimidos do que no ponto 1, logo as propriedades permeabilidade, k , e porosidade, ε , tem menor valor numérico no ponto 2 do que no ponto 1, raciocínio que leva a conclusão de que a permeabilidade, k , e porosidade, ε da torta decrescem com o decorrer do escoamento até estabilizarem, definindo duas regiões: região de torta incompressível e região de torta compressível (ALSABA, 2014).

Durante o processo de perfuração dos poços de petróleo ocorre filtração quando o fluido de perfuração é pressionado contra as paredes porosas do poço, como descrito a seguir, tornando tal filtração um ponto importante a ser estudado para otimização da extração do petróleo, justificando o trabalho em questão.

Uma das principais funções do fluido de perfuração é controle da pressão da formação e estabilidade das paredes do poço. Durante o processo de perfuração o fluido está em contato direto com as paredes porosas (rochas porosas) do poço, podendo trabalhar em regime *underbalanced*, *nearbalanced* ou *overbalanced* (MARTINS, 2013; CALABREZ, 2013).

No caso da pressão hidrostática estar em equilíbrio com a pressão dos poros tem-se o regime chamado *nearbalanced*. Já quando a pressão do reservatório supera a pressão do poço, diz-se regime *underbalanced*, que pode causar influxo do fluido contido na formação rochosa para o poço, fenômeno chamado *kick*. Por fim, quando a pressão do poço é maior que a pressão do poro há influxo do fluido de perfuração para a formação, caracterizando a

situação de *overbalanced* (BRITO, 2008; WALDMANN, 2005).

É pertinente que a operação aconteça em *overbalanced* evitando o fenômeno *kick* e cooperando para a estabilidade das paredes do poço (vide Capítulo 1), na qual o fluido está em contato com as rochas porosas. Uma vez que os fluidos contem sólidos em suspensão e são pressurizados contra as rochas porosas, há escoamento no sentido das rochas caracterizando uma filtração (BRITO, 2008; WALDMANN, 2005).

Nem todos os sólidos suspensos no fluido de perfuração tem diâmetro maior que os poros das rochas dos poços, que também não tem poros todos de mesmo tamanho. Sendo assim os sólidos constituintes dos fluidos de perfuração e partículas suspensas da formação que possuem diâmetro inferior ao diâmetro dos poros penetram nos poros rochosos formando inicialmente uma torta interna, esse processo ocorre em um curto período de tempo e é conhecido como *spurtloss*; posteriormente, após o tamponamento dos poros, há um acúmulo de partículas maiores externamente aos poros constituindo uma torta externa e permeável, também chamada de reboco; e a porção líquida do fluido que percola essas tortas é chamado de filtrado que é controlada pela permeabilidade do reboco (SKALLE, 2011).

Tal filtração pode ser estática ou dinâmica. Na filtração estática quando a circulação do fluido é interrompida, o reboco de baixa permeabilidade formado cresce continuamente sendo o responsável por controlar as taxas de filtração no poço. Portanto, na medida em que a espessura do reboco vai aumentando, as taxas de filtração vão diminuindo ao longo do tempo. Na filtração dinâmica quando há circulação do fluido, a espessura do reboco é função do equilíbrio dinâmico entre a taxa de deposição das partículas e a taxa de erosão da torta de filtração provocada pelo escoamento do fluido no poço. Sendo assim, quando esse equilíbrio é atingido o reboco adquire uma espessura constante e consequentemente as taxas de filtração no poço serão constantes também, ou seja, não haverá mais a erosão da torta e nem o crescimento da torta, como ilustra a Figura 2.11 (LIU & CIVAN, 1993).

Para otimização da extração de petróleo, é necessário conhecimento e controle da filtração e escoamento em meios porosos, justificando o trabalho em questão. A fim de estudar tal escoamento, apresentam-se nesse trabalho dados do escoamento de água e goma xantana em meios porosos sob altas pressões, ou seja, fluidos sem sólidos em suspensão. Por isso serão estudados equacionamentos para conhecimento da permeabilidade e resistência apenas do meio filtrante e não da torta.

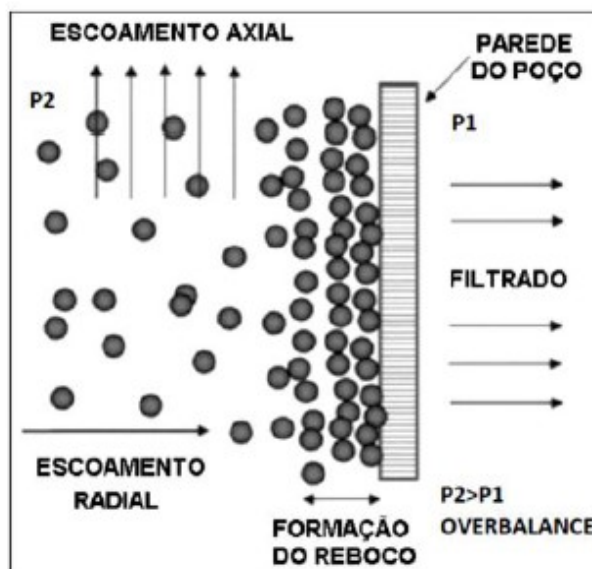


Figura 2.11 – Filtração dinâmica (MARTINS, 2013).

2.3.1 Desenvolvimento matemático

Aplicando a equação do movimento para a situação em que o meio poroso isotrópico e homogêneo é percolado por um fluido newtoniano no caso em que o escoamento é uniforme, ou seja, quando o campo da velocidade q é uniforme, a equação do movimento toma forma apresentada na Equação 2.2 (MASSARANI, 2002):

$$0 = -\text{grad } p - m \quad (2.2)$$

Na qual p é a pressão e m é a força resistiva, essa que é foco de pesquisas desde o trabalho pioneiro de Henry Darcy (1856, apêndice D) com experimentação conduzida nos últimos 150 anos, fornece para a força resistiva m a Equação 2.3 amplamente conhecida como forma quadrática de Forchheimer, válida para escoamento viscoso em meios isotrópicos homogêneos e heterogêneos, ou seja, meios nos quais k e c são, respectivamente, constantes ou variáveis com a posição no sistema (MASSARANI, 1967). A Equação 2.3 é válida também para situações não isotérmicas, desde que a viscosidade e a densidade tenham suas respectivas variações verificadas ao longo do escoamento (MASSARANI, 1969).

$$\mathbf{m} = \frac{\mu}{k} \left[1 + \frac{c\rho\sqrt{k}\|q\|}{\mu} \right] q \quad (2.3)$$

Onde μ é a viscosidade do fluido newtoniano, k e c são parâmetros que dependem apenas de fatores estruturais da matriz porosa quando não ocorrem interações físico-químicas entre matriz e fluido, sendo c um parâmetro adimensional e k a permeabilidade do meio poroso com dimensão L^2 , ρ é a densidade do fluido e q a velocidade superficial do fluido (MASSARANI, 1989).

Como explicitado acima, a equação quadrática de Forchheimer limita-se ao escoamento de fluidos newtonianos. Para expandir sua utilidade para a vasta gama de fluidos não-newtonianos faz-se necessário a correção da viscosidade substituindo μ pela viscosidade efetiva μ_{ef} como mostra as Equações 2.4 e 2.5.

$$\mu_{ef} = \frac{S(\lambda^*)}{\lambda^*} \quad (2.4)$$

$$\lambda^* = \frac{1,1}{(2,5 \varepsilon_f)^{\frac{1}{2}}} \frac{\|q\|}{\sqrt{k}} \quad (2.5)$$

Onde $S(\lambda^*)$ é a função tensão cisalhante (uma propriedade material do fluido), (λ^*) a taxa de distensão característica (uma propriedade cinemática do escoamento) e ε a porosidade do meio poroso (SILVA TELLES e MASSARANI, 1979).

Na situação em que o escoamento de fluido na matriz porosa é lento, como no caso de escoamento de fluidos muito viscosos (goma xantana, por exemplo),

$$\frac{c\rho\sqrt{k}\|q\|}{\mu} \ll 1 \quad (2.6)$$

a Equação 2.3 recai na forma linear

$$\mathbf{m} = \frac{\mu}{k} q \quad (2.7)$$

amplamente conhecida como “lei” de Darcy (MASSARANI e SILVA TELLES, 1975).

Para escoamento unidirecional a equação de Darcy, Equação 2.2 e Equação 2.3 tomam forma da Equação 2.8.

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\mu q}{k} + \frac{c\rho q^2}{\sqrt{k}} \quad (2.8)$$

Integrando a Equação 2.8 para o caso em que o escoamento é incompressível tem-se, a Equação 2.9 que será utilizada para calcular experimentalmente os parâmetros k e c , através do método experimental chamado permeametria, onde L é o comprimento do meio poroso utilizado (MASSARANI, 2002).

$$\frac{1}{q} \left(-\frac{\Delta p}{L} \right) = \frac{\mu}{k} + \frac{c\rho}{\sqrt{k}} q \quad (2.9)$$

$$y = b + ax \quad (2.10)$$

Nota-se que a Equação 2.9 apresenta-se na sua forma linear, como explicita a Equação 2.10, em que a variável y equivale a $\frac{1}{q} \left(-\frac{\Delta p}{L} \right)$, a variável x é equivalente a q e os coeficientes angular e linear equivalem-se, respectivamente, $a = \frac{c\rho}{\sqrt{k}}$ e $b = \frac{\mu}{k}$.

3 METODOLOGIA

A seguir serão descritas as metodologias realizadas nesse trabalho. São separadas em duas partes distintas, sendo elas: ensaios de permeametria e ensaios reológicos.

3.1 Permeametria

Para melhor compreensão da permeabilidade das rochas porosas dos poços quando percoladas pelas lamas de perfuração estuda-se nesse trabalho um procedimento experimental para determinação da permeabilidade, k , de um meio poroso, chamado permeametria, que basicamente é um conjunto de medidas de vazão e queda de pressão efetuadas com a amostra, como ilustra a Figura 3.1, na qual L é o comprimento do meio poroso, P_1 e P_2 são pressões e Q é a vazão (MASSARANI, 2002).

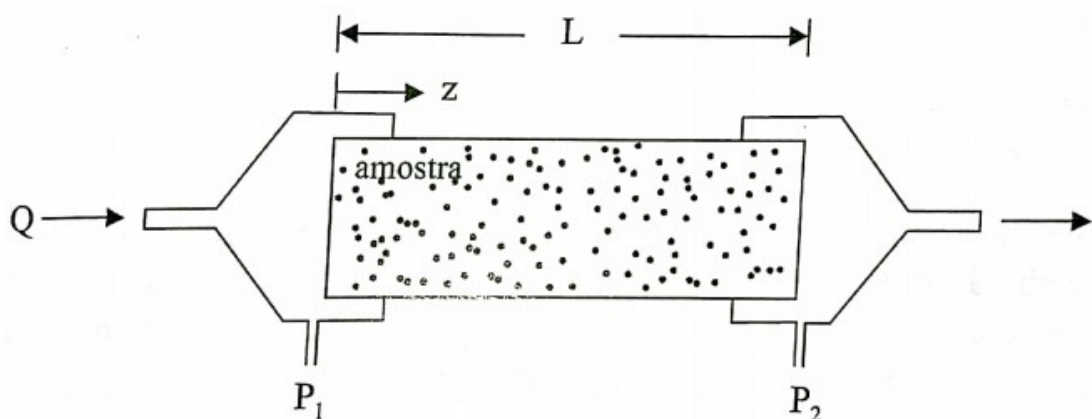


Figura 3.1 – Permeâmetro (MASSARANI, 2002).

Na permeametria mede-se volume de fluido que escoar no meio poroso e também o tempo que tal volume leva para o escoamento, obtendo assim a vazão através da Equação 3.1. Mede-se também as pressões P_1 e P_2 .

$$\text{Vazão volumétrica } (Q) = \frac{\text{Volume}}{\text{Tempo}} \quad (3.1)$$

A Equação 2.9, será utilizada para determinação da permeabilidade. Repetindo o

experimento para diferentes vazões e pressões e plotando os dados obtidos $\frac{1}{q} \left(-\frac{\Delta p}{L} \right)$ versus q , tem-se a reta relativa a Equação 2.10 com valores para os coeficientes, a e b . Através da Equação 3.2 calcula-se a permeabilidade do meio poroso, k , e através da Equação 3.3 calcula-se, finalmente, o parâmetro adimensional, c . Uma descrição mais detalhada do procedimento experimental será feita no item 3.1.2.

$$b = \frac{\mu}{k} \quad (3.2)$$

$$a = \frac{c\rho}{\sqrt{k}} \quad (3.3)$$

3.1.1 Procedimento experimental

A permeabilidade é uma característica exclusiva do meio poroso, independente do fluido por ele percolado (MASSARANI, 2002). A fim de demonstrar tal afirmação experimentalmente foram efetuados ensaios de permeamtria com água destilada e solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v. Água destilada foi escolhida para tal função por ser um fluido de fácil obtenção, baixo custo e baixo tempo de ensaio experimental. Já a solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v foi escolhida para os ensaios pelo seu baixo custo relativo, fácil preparo, por ser componente de lamas de perfuração e por possuir propriedades reológicas pseudoplásticas semelhantes às lamas.

a) Ensaios utilizando água destilada

Considera-se que as rochas porosas dos poços de petróleo estão repletas de fluido quando são permeadas pela lama de perfuração. Logo, antes de efetuar o ensaio de permeamtria a membrana a ser utilizada (Ofite 50 micras) passa pelo processo de saturação. Tal processo consiste em colocar a membrana em um béquer com água destilada e colocá-lo no interior de um dessecador a vácuo. Tampa-se o dessecador e aciona-se um motor elétrico a ela conectado para gerar o vácuo necessário, forçando o ar presente nos poros da membrana a dar lugar a água destilada. Deixa-se o béquer no dessecador em operação durante cinco minutos.

A membrana utilizada é da marca Ofite, ilustrada na Figura 3.2, com poros de diâmetro de 50 micras, com geometria cilíndrica, sendo seu diâmetro de 63,11 milímetros e espessura $L=6,02$ milímetros.

Após a saturação da membrana inicia-se os ensaios de permeamtria. Deve-se efetuar ensaios com diferentes vazões e pressões, sendo assim foram efetuados ensaios em triplicata com volumes de 200, 300 e 400 ml de água destilada. Para cada volume de água, foram feitos três ensaios para cada uma das pressões a seguir, variadas de dois em dois Bar: 4, 6, 8, 10, 12 e 14 Bar, totalizando 54 ensaios.

Os ensaios foram efetuados utilizando um filtro HTHP (*High Temperature and High Pressure*) da marca Ofite (Dynamic Filter Press) como ilustrado nas Figuras 3.3 e 3.4. A membrana saturada é colocada no compartimento a ela designado como ilustra a Figura 3.3 e introduz-se no interior do filtro os volumes de água definidos, iniciando por 200 ml. Depois de montado o filtro com o volume de água estipulado, pressuriza-se o sistema através de um cilindro de gás nitrogênio com uma válvula de controle de pressão e um manômetro, conectado ao filtro através de uma mangueira de borracha, iniciando com a primeira triplicata de ensaios a 4 Bar.



Figura 3.2 – Membrana Ofite 50 micras.

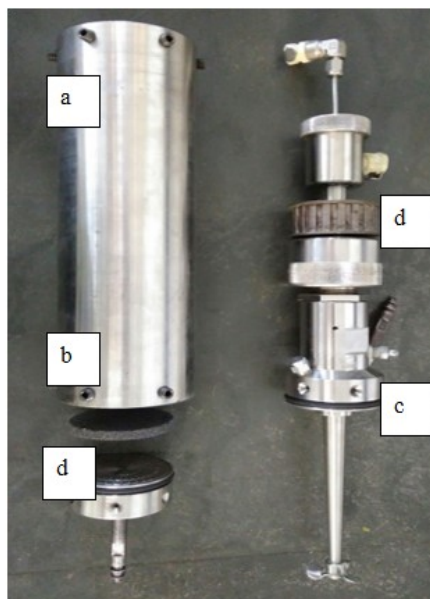


Figura 3.3: Complexo célula de teste interna ao filtro HTHP.

Na Figura 3.3 onde lê-se “a” lê-se célula de teste, “b” membrana Ofite (50 micras - disco de cerâmica), “c” hélice de dispersão “d” válvulas.

Com o filtro já pressurizado, abre-se a válvula inferior do sistema que dá início ao escoamento. No instante em que a válvula é aberta, o operador do sistema dispara o cronômetro que mede o tempo de escoamento. A água que sai do sistema é depositada em um béquer como ilustra a Figura 3.4 e o operador acompanha a elevação do nível da água até atingir a marca de 200 ml. Ao atingir tal marca, o operador pausa o cronômetro e fecha a válvula simultaneamente, de maneira a obter um volume de filtrado por tempo de escoamento.

Para garantir exatidão a medida de volume, leva-se o béquer com o filtrado a uma balança de precisão onde mede-se a massa de filtrado e através da Equação 3.4 (a densidade da água na temperatura operacional é conhecida) um volume preciso é calculado. Repete-se o experimento com mesmo volume e mesma pressão mais duas vezes (triplicata) a fim de garantir a precisão dos dados colhidos e minimizar possíveis erros experimentais atrelados a falhas operacionais.

$$Volume = \frac{Massa}{\rho} \quad (3.4)$$

Onde ρ é a densidade da água destilada.



Figura 3.4: Filtro HTHP.



Figura 3.5 – Filtro HTHP informações.

Os dados obtidos são anotados na planilha de controle utilizando o *software* Excel, sendo eles pressão, volume de filtrado por tempo, que quando dividida pela área superficial da membrana gera a vazão q através da Equação 3.5, que será posteriormente aplicada à Equação 2.9 . Em caso de dados não coesos, conclui-se erro no experimento e o ensaio que apresenta resultados duvidosos é repetido.

$$q = \frac{\text{Volume de filtrado}}{\text{Tempo de escoamento} \times \text{Área superficial da membrana}} \quad (3.5)$$

Concluída a primeira triplicata com volume de água destilada de 200 ml e pressão de 4 Bar, repete-se todo o procedimento acima descrito para a pressão de 6 Bar, posteriormente de 8 Bar e assim por diante, até atingir a última pressão de 14 Bar, uma triplicata de ensaios para cada volume de água destilada e pressão definidos.

Após concluído todas as triplicatas de ensaios para as pressões de 4,6,8,10,12 e 14 Bar utilizando 200ml de água destilada com resultados satisfatórios, repete-se todo o experimento para o volume de 300 ml e 400 ml de água destilada, cada um varrendo todas as pressões citadas e também, para cada pressão e volume determinados, uma triplicata de ensaios.

Finalmente colhidos os dados das triplicatas 200 ml de água destilada a 4,6,8,10,12 e 14 Bar, das triplicatas 300 ml de água destilada a 4,6,8,10,12 e 14 Bar e das triplicatas 400 ml de água destilada a 4,6,8,10,12 e 14 Bar, conclui-se a etapa de ensaios utilizando água destilada e aplica-se os dados obtidos na Equação 2.9, plotando uma reta e obtendo os coeficientes lineares e angulares dessa reta, que nos fornecem através das Equações 3.2 e 3.3, finalmente, a permeabilidade do meio poroso, k . Tal procedimento de tratamento de dados será cuidadosamente descrito no Capítulo 4.

b) Ensaios utilizando Goma Xantana

Os ensaios utilizando a solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v são semelhantes aos ensaios utilizando água destilada em termos de procedimentos e operações, com adição das etapas de preparo da solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v e as etapas de lavagem da membrana e célula de teste entre um ensaio e outro. Vale ressaltar que a solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v tem durabilidade média de três semanas, sendo que após tal período manifestam-se colônias de fungos na solução, ou seja, após preparada deve-se fazer todos os ensaios (permeametria e reologia) em até três semanas após seu preparo, sendo que após esse período a goma perde sua validade.

(i) Preparo da solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v

Adiciona-se em um béquer 998 ml de água destilada, 2 gramas de goma xantana em pó P.M. 933,75 da marca êxodo científica e 2 ml de formaldeído 37% P.A., esse último é

adicionado para evitar proliferação de microrganismos na solução. Agita-se a solução utilizando o agitador IKA Labortechnik RW20DZM.n até a obtenção de uma solução homogênea. A solução após a agitação deve ficar em repouso durante 24 horas antes de ser utilizada, tempo de hidratação.

(ii) Procedimento experimental

Assim como descrito em a), considera-se que as rochas porosas dos poços de petróleo estão repletas de fluido quando são permeadas pela lama de perfuração. Logo, a fim de manter a fidelidade do experimento, antes de efetuar o ensaio a membrana a ser utilizada (Ofite 50 micras) passa pelo processo de saturação idêntico ao descrito em a), substituindo água destilada pela solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v.

Após a saturação da membrana inicia-se os ensaios de permeamtria. Deve-se efetuar ensaios com diferentes vazões e pressões, sendo assim foram efetuados ensaios em triplicata com o volume de 200 ml de solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v. Para cada volume de goma, foram feitos três ensaios para cada uma das pressões a seguir, variadas de dois em dois Bar: 4, 6, 8, 10, 12 e 14 Bar, totalizando 54 ensaios, idênticos aos descritos em a).

A membrana após o escoamento da solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v apresenta uma camada de goma superficial que prejudicaria os resultados do próximo ensaio se não removida, tornando necessário a lavagem da membrana. Tal lavagem é conduzida da seguinte maneira: escoar-se 400 ml de água a 14 Bar duas vezes de cada lado da membrana, garantindo sua limpeza. Dessa forma, após a lavagem, faz-se necessário repetir o procedimento de saturação para que todos os poros do meio estejam completos pela solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v, apresentando finalmente a membrana preparada para o próximo ensaio.

Finalmente colhidos os dados das triplicatas 200 ml de solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v a 4,6,8,10,12 e 14 Bar, das triplicatas 300 ml de goma a 4,6,8,10,12 e 14 Bar e das triplicatas 400 ml de goma a 4,6,8,10,12 e 14 Bar, conclui-se a etapa de ensaios utilizando solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v e aplica-se os dados obtidos na Equação 2.9, plotando uma reta e obtendo os coeficientes lineares e angulares dessa reta, que nos fornecem através das Equações 3.2 e 3.3, finalmente, a permeabilidade do meio poroso, k , permeabilidade que deve apresentar resultados muito próximos dos obtidos na

permeametria utilizando água destilada. Tal procedimento de tratamento de dados será cuidadosamente descrito no Capítulo 4.

3.2 Reologia

Como citado no item anterior, ao efetuar os ensaios de permeametria utilizando goma xantana, forma-se sobre a membrana um acúmulo de material viscoso dificultando a percolação da GX na membrana. A fim de melhor compreender essa retenção de material viscoso na solução aquosa de Goma Xantana 0,2% v/v durante o escoamento em diferentes pressões e também as mudanças nas propriedades reológicas da solução Goma Xantana 0,2% v/v durante o escoamento em meios porosos, efetua-se ensaios reológicos antes e depois do escoamento.

Utilizou-se o viscosímetro para baixas taxas de deformação *Low Viscosity Digital Viscometer* (LVDV2T) da marca Brookfield, *spindles* de geometria cone-placa e um banho termostático para controle de temperatura, 25 °C, como ilustra a Figura 3.5.

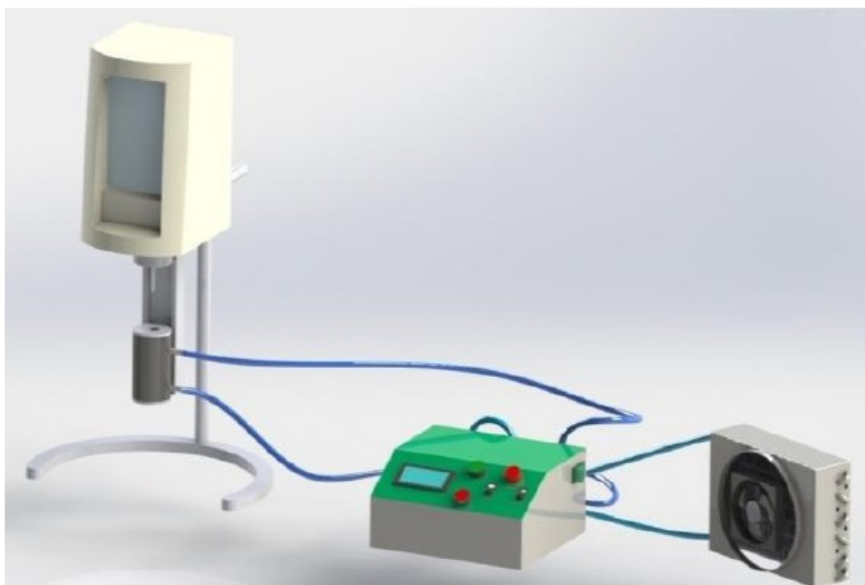


Figura 3.5 – Viscosímetro.

A etapa inicial dos testes consiste em um pré-cisalhamento de 1 minuto para quebrar as possíveis estruturas gelificadas presentes na GX, com taxa de deformação de 100 s^{-1} , seguido de um repouso de 5 minutos para reorganização molecular (MELO, 2008; FAGUNDES, 2015).

Inicia-se então 10 minutos de cisalhamento, aplicando uma taxa de deformação de 100 s^{-1} , colhendo um dado experimental a cada 20 segundos de operação, para obtenção de dados de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente. Decorridos esses 10 minutos, deixa-se a GX em repouso novamente por 5 minutos para reorganização molecular.

Inicia-se o segundo ciclo com um pré-cisalhamento de 1 minuto para quebrar as possíveis estruturas gelificadas presentes na GX, com taxa de deformação de 100 s^{-1} , seguido de um repouso de 5 minutos para reorganização molecular e em seguida inicia-se 10 minutos de cisalhamento, aplicando uma taxa de deformação de 50 s^{-1} , colhendo um dado experimental a cada 20 segundos de operação.

Repete-se o ciclo anterior mais 4 vezes alterando apenas a taxa de deformação, sendo elas 50, 25, 10 e 5 s^{-1} .

Finalizada a descrição dos procedimentos experimentais, serão apresentados no Capítulo 4 os resultados obtidos, devidamente tratados e comentados.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão descritos os resultados obtidos na realização dos testes experimentais de permeametria e reologia.

4.1 Permeametria

Como explicitado no Capítulo 3, a permeametria tem como objetivo determinar a permeabilidade de um meio poroso. Fez-se ensaios escoando água destilada e solução aquosa de goma xantana 0,2% v/v.

4.1.1 Goma Xantana

Conforme descrito na seção 3.1.1. foram efetuados três ensaios para cada pressão, escoando 200 ml de GX através da membrana. Nota-se que o escoamento da solução de GX através do meio poroso pode ser considerado lento devido a sua viscosidade, dessa forma a Equação 2.3 recai em sua forma simplificada descrita pela Equação 2.7, amplamente conhecida como equação de Darcy, na qual m é dado por $\frac{\Delta p}{L}$.

Os dados obtidos de velocidade superficial, q , para cada pressão e também o termo $\left(\frac{\Delta p}{L}\right)$ da Equação 2.7 estão explicitados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados permeametria GX

$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)(\text{kg/m}^3\text{s}^2)$	$q (\text{m}^3/\text{m}^2\text{s})$	P (Pa)
66445178,45	0,005102541	400000
99667769,84	0,007654667	600000
132890370,11	0,008670098	800000
166112962,06	0,01101837	1000000
199335548,16	0,012049465	1200000
232558139,63	0,013212283	1400000

Plota-se os dados da primeira coluna da Tabela 4.1, referente a y , *versus* os da segunda coluna, referente a x , na Figura 4.1.

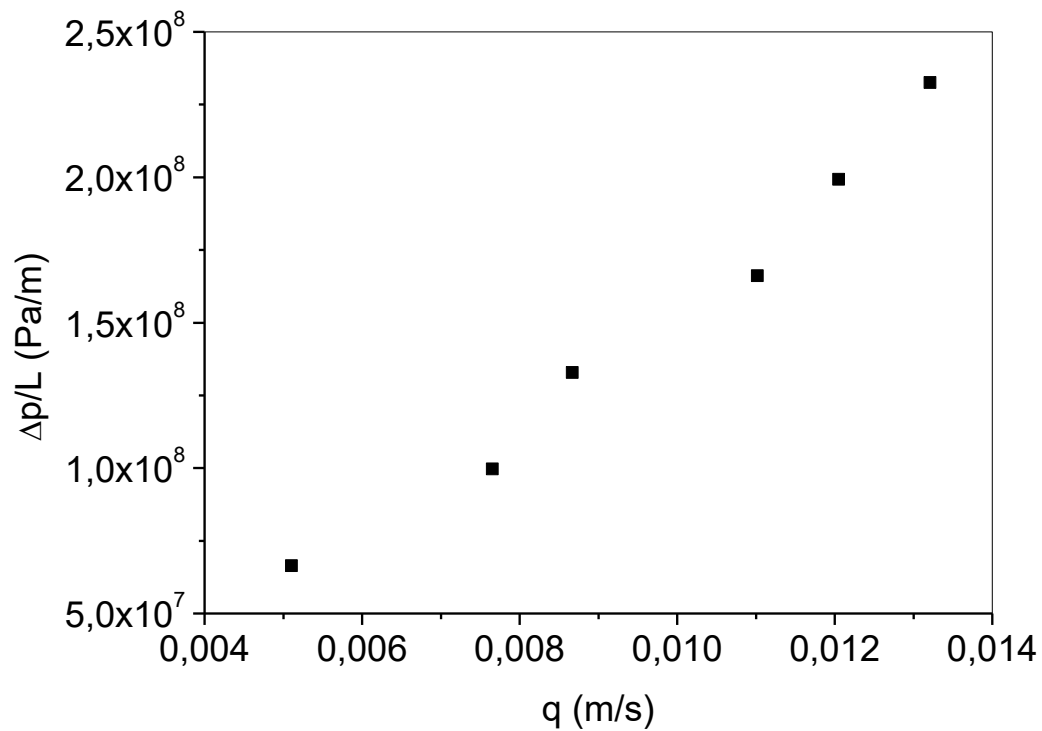


Figura 4.1 – Resultados permeamtria GX

Fazendo uma regressão linear com os dados da primeira e segunda colunas da Tabela 4.1 utilizando o *software STATISTICA* obtém-se a Equação 4.1,

$$y = 2,3046.10^{10}x \quad (4.1)$$

a qual apresenta os valores de $a = 5,598684.10^{11}$ e $b = 9,713690.10^9$.

Das equações 2.7 e 2.4 tem-se a Equação 4.2:

$$b = \frac{\frac{S(\lambda^*)}{\lambda^*}}{k} \quad (4.2)$$

Para qual $S(\lambda^*)$ utilizaremos o modelo de Power-Law descrito pela Equação 4.3.

$$S(\lambda^*) = m.(\lambda^*)^n \quad (4.3)$$

Na qual os parâmetros $m = 0,6700$ e $n = 0,3153$ obtidos através dos testes reológicos apresentados no item 4.2. Através das equações 4.2; 4.3 e 2.5, obtém-se a Equação 4.4.

$$b = \frac{m \cdot \left(\frac{1,1}{(2,5 \varepsilon_f)^{\frac{1}{2}}} \frac{\|q\|}{\sqrt{k}} \right)^{n-1}}{k} \quad (4.4)$$

sendo a porosidade da membrana $\varepsilon_f = 0,33$ e a velocidade superficial média $\|q\| = 0,009617904$ m/s, e $b = 2,3 \cdot 10^9$, $m = 0,6700$ e $n = 0,3153$, calcula-se a permeabilidade do meio poroso $k = 9,8433 \cdot 10^{-15}$ m².

4.1.2 Água destilada

A Tabela 4.2 explicita os dados obtidos no escoamento de água destilada, sendo velocidade superficial, q , para cada pressão e também o termo $\frac{1}{q} \left(-\frac{\Delta p}{L} \right)$ da Equação 2.9.

Tabela 4.2 - Dados permeamtria água destilada

$\frac{1}{q} \left(-\frac{\Delta p}{L} \right) (\text{kg/m}^2\text{s})$	$q (\text{m}^3/\text{m}^2\text{s})$	P (Pa)
7230587922	0,009189	400000
9172792192	0,010866	600000
10465123026	0,012698	800000
11729013948	0,014163	1000000
13232490223	0,015064	1200000
14211718142	0,016364	1400000

Comparando a Equação 2.9 com a Equação 2.10, plota-se os dados da primeira coluna da Tabela 4.2 , referente a y , *versus* os da segunda coluna, referente a x , na Figura 4.2.

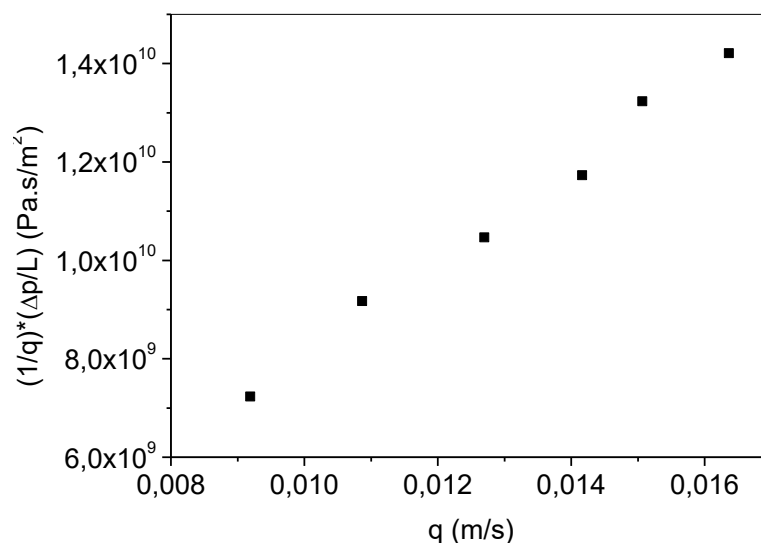


Figura 4.2 - Resultados permeametriá água destilada.

Fazendo uma regressão linear com os dados da primeira e segunda colunas da Tabela 4.2 utilizando o *software STATISTICA* obtém-se a Equação 4.5,

$$y = 9,613406 \cdot 10^{11}x + 1,545591 \cdot 10^9 \quad (4.1)$$

a qual apresenta os valores de $a = 9,613 \cdot 10^{11}$ e $b = 1,545 \cdot 10^9$.

Aplicando o valor de $b = 1,545591 \cdot 10^9 \text{ kg/m}^3\text{s}$ e $\mu = 0,91 \text{ cP}$ na Equação 3.2 e fazendo as conversões de unidade adequadas obtém-se o valor da permeabilidade do meio poroso $k = 5,887715 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

Sabe-se que a permeabilidade é uma propriedade do meio poroso independentemente do fluido que o percola, tornando esperado valores de k iguais para os ensaios com fluidos diferentes. Nota-se que o valor de k obtido nos ensaios de escoamento de água destilada apresentam valor diferente do obtido nos ensaios escoando goma xantana. Tal fato é explicado pela hipótese de que ao escoar goma xantana na membrana, parte do material foi retido formando uma fina camada gelatinosa sobre a membrana. Essa fina camada dificulta o escoamento da GX e explica o valor de $k = 7,217448 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ obtido nos ensaios escoando o material pseudoplástico menor que o valor de $k = 5,887715 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ obtido nos ensaios escoando água.

Para comprovar essa hipótese foram efetuados ensaios reológicos com a solução de goma xantana 0,2% v/v antes e depois do escoamento. Espera-se que as propriedades viscosas do material diminuam comparando antes e depois do escoamento, uma vez que ao escoar parte das estruturas rígidas da solução é retida.

4.2 Reologia

Como descrito em 3.2, os ensaios reológicos têm como objetivo mostrar o comportamento reológico da goma xantana antes e depois do escoamento, sob pressões de escoamento de 4 a 14 Bar variando 2 a 2. A Figura 4.3 ilustra o comportamento da goma xantana após o escoamento em todas essas pressões, na qual o eixo x representa a taxa de deformação (s^{-1}) e o eixo y a tensão cisalhante (Pa).

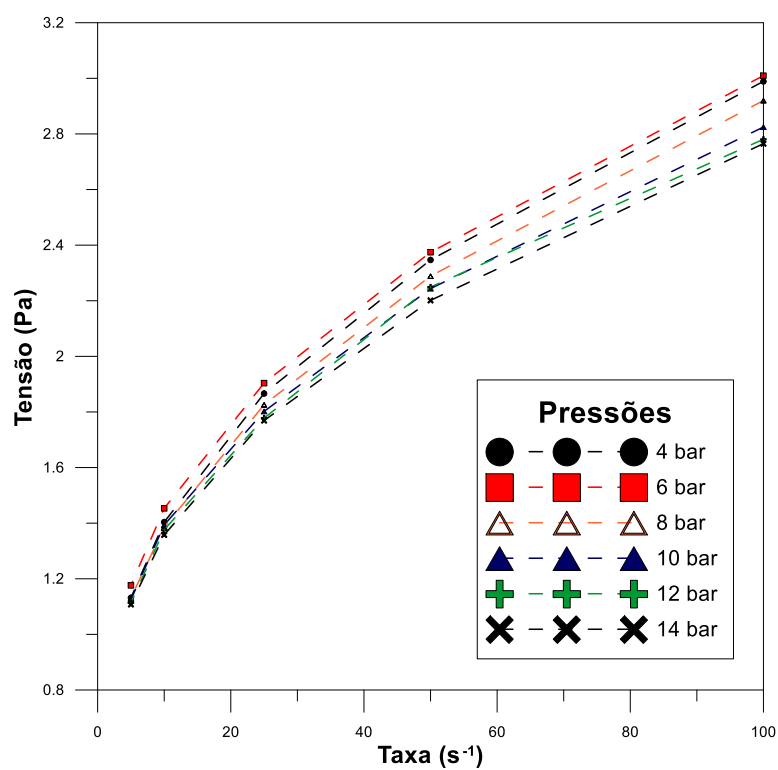


Figura 4.3 – Comportamento reológico GX pós escoamento

Nota-se que as curvas apresentam concavidade para baixo característica de fluidos que apresentam comportamento pseudoplástico, como ilustra a Figura 2.3, o que é esperado em

soluções de goma xantana. A Figura 4.4 ilustra o comportamento reológico da goma xantana antes e depois do escoamento.

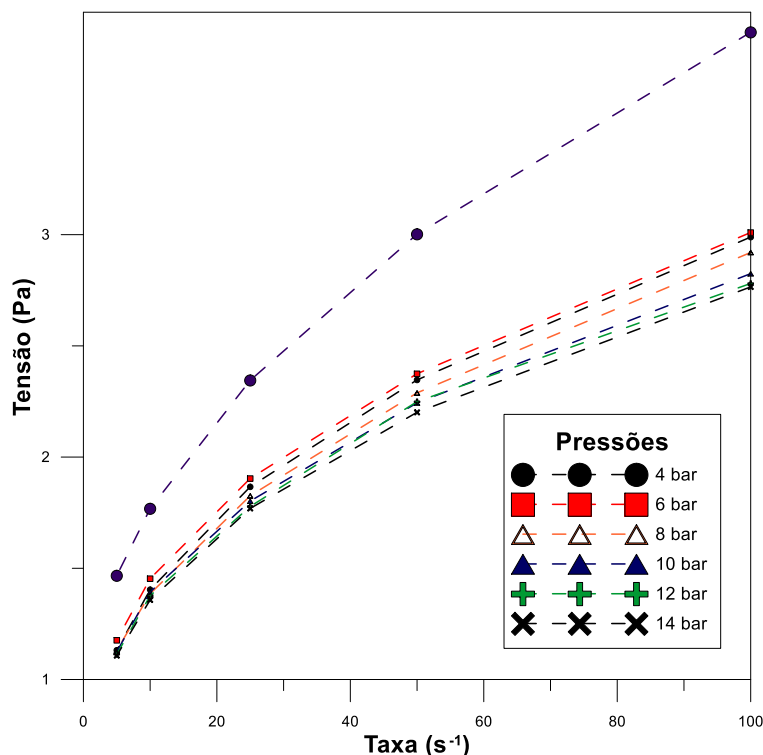


Figura 4.4 - Comportamento reológico GX

Nota-se que antes do escoamento a solução de goma xantana 0,2% v/v apresenta maiores valores de tensão cisalhante por taxa de deformação aplicada do que depois de passar pelo meio poroso. Isso é explicado pelo fato de que parte do material viscoso presente na solução é retido na superfície da membrana, gerando depois do escoamento uma solução com menor resposta de tensão por taxa aplicada.

Nota-se também que as curvas de tensão cisalhante por taxa de deformação dos fluidos pós escoamento apresentam comportamento muito próximo, porém não se sobrepõem, sendo que os fluidos que escoaram sobre maiores pressões apresentam menores tensões cisalhantes por taxa de deformação aplicada.

A Tabela 4.3 apresenta os valores de taxa de deformação (s^{-1}), tensão de cisalhamento (Pa) e viscosidade aparente (cP) das soluções de goma xantana 0,2% v/v antes e depois do escoamento, sendo o escoamento efetuado na pressão de 14 bar.

Nota-se que para menores taxas de deformação ambas as soluções apresentam maiores valores de viscosidade quando comparadas com maiores valores de taxa, caracterizando comportamento pseudoplástico de ambas as soluções. Entretanto, ao comparar os valores de

viscosidade das duas soluções para mesma taxa de deformação, nota-se que a solução antes do escoamento apresenta maior viscosidade do que depois do escoamento, explicitando novamente o resultado da retenção do material viscoso na superfície da membrana durante o escoamento.

Tabela 4.3 – Dados de reologia GX

Taxa (1/s)	Viscosidade pré escoamento (cP)	Tensão pré escoamento (Pa)
100	39,100	3,910
50	60,046	3,002
25	93,814	2,345
10	176,710	1,768
5	293,493	1,467
Taxa (1/s)	Viscosidade pós escoamento (cP)	Tensão pós escoamento (Pa)
100	27,643	2,7650
50	44,004	2,201
25	70,781	1,769
10	135,684	1,358
5	221,419	1,107

A Figura 4.5 apresenta a curva de tensão de cisalhamento (Pa) por taxa de deformação (s^{-1}) da solução de goma xantana 0,2 % v/v antes do escoamento.

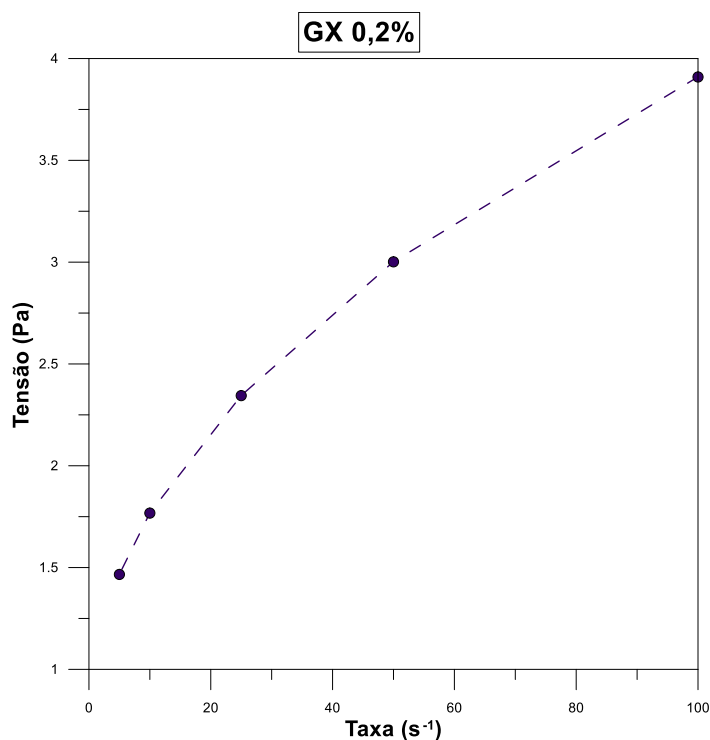


Figura 4.5 – Comportamento reológico GX

Ajusta-se a curva ilustrada na Figura 4.5 de acordo com o modelo de *Power-Law* descrito na Equação 4.3 e obtém-se os resultados mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Ajuste *Power-Law*.

m	n	R ²
0,807	0,339	0,998

Aqui, o parâmetro m do modelo de *Power-Law* representa o índice de consistência do fluido, sendo que para maiores valores de m maior é a resistência do fluido ao entrar em escoamento. O parâmetro n representa a newtoniedade do fluido, apresentando valores entre 0 e 1 para fluidos pseudoplásticos, quanto mais próximo de 1 for o valor de n mais semelhante ao fluido newtoniano é o seu comportamento (FOX E MCDONALD, 2001).

A Tabela 4.5 por sua vez mostra o ajuste das curvas de tensão cisalhante por taxa de deformação dos dados obtidos nos ensaios reológicos dos filtrados de acordo também com o modelo de *Power-Law*, ilustrados na Figura 4.3.

Tabela 4.5 – Ajuste de *Power-Law* pós escoamento.

P (bar)	m	n	R ²
4	0,6569	0,3277	0,999
6	0,6959	0,3164	0,998
8	0,6561	0,3220	0,997
10	0,6760	0,3090	0,998
12	0,6718	0,3080	0,998
14	0,6635	0,3086	0,998

Os valores apresentados na Tabela 4.5 representam os valores de m e n utilizados no cálculo da permeabilidade do meio poroso na Equação 4.4.

Nota-se comparando os valores de o índice de consistência do fluido m antes e depois do escoamento que os valores são menores nos filtrados do que na solução antes dos testes, o que é esperado já que esse valor representa a resistência ao escoamento e parte da goma xantana ficou retida na superfície do meio poroso ao escoar. A comparação dos valores de índice de comportamento n mostra valores próximos pós escoamento aos obtidos nos ensaios com a solução original.

Na Tabela 4.6 tem-se o cálculo da viscosidade efetiva μ_{ef} para o escoamento, como ilustra a Figura 4.6.

Tabela 4.6 - Cálculo da viscosidade efetiva.

P (Pa)	q (m ³ /m ² s)	m	n	μ_{ef} (kg/m.s)
400000	0,005102541	0,6569	0,3277	0,0034
600000	0,007654667	0,6959	0,3164	0,0025
800000	0,008670098	0,6561	0,3220	0,0022
1000000	0,01101837	0,6760	0,3090	0,0018
1200000	0,012049465	0,6718	0,3080	0,0016
1400000	0,013212283	0,6635	0,3086	0,0015

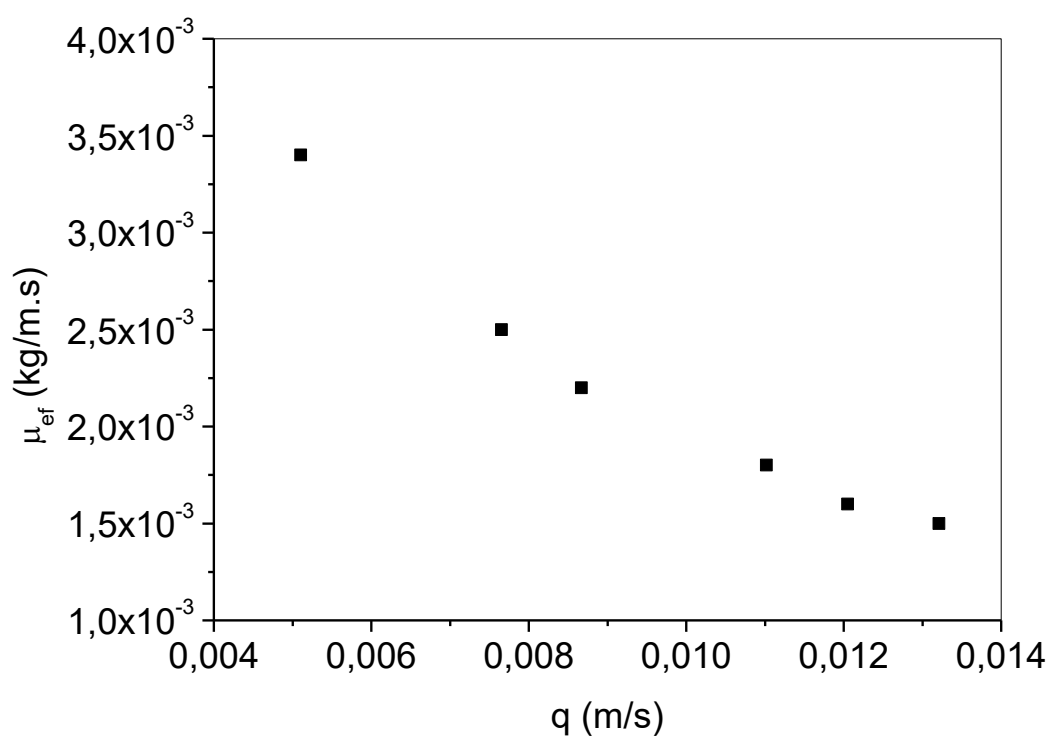


Figura 4.6 – Viscosidade GX

A Figura 4.6 ilustra o comportamento pseudoplástico da goma xantana, na qual a viscosidade efetiva diminui com o aumento da velocidade de escoamento. Quando maior a velocidade, menor a resistência do fluido ao escoamento.

5 CONCLUSÃO

Os valores obtidos para permeabilidade do meio poroso (k) estudado na permeamtria escoando água destilada e solução aquosa de goma xantana 0,2% v/v são, respectivamente, $5,887.10^{-12} \text{ m}^2$ e $9,8433.10^{-15} \text{ m}^2$. Inicialmente esperava-se a obtenção de valores iguais em ambas experimentações pelo fato de a permeabilidade ser uma propriedade dependente apenas das características do meio poroso, independente do fluido por ele percolado.

No entanto, nota-se que o valor da permeabilidade determinada pela experimentação com a solução viscosa de GX é menor do que o obtido nos ensaios com água destilada, levantando a hipótese da retenção de material viscoso da solução de GX sobre a superfície da membrana dificultando a percolação do fluido no meio poroso durante o escoamento.

Analisando os ensaios reológicos da solução de goma xantana antes e depois do escoamento através do meio poroso nota-se mudanças nas propriedades reológicas da solução, apresentando relevante decréscimo nos valores de viscosidade aparente e tensão cisalhante para mesma taxa de deformação, caracterizando uma diminuição das propriedades pseudoplásticas do fluido após o escoamento.

Conclui-se então que a solução aquosa de goma xantana tem suas propriedades reológicas alteradas durante o escoamento em meios porosos devido a retenção de material viscoso na superfície da membrana porosa, dificultando o escoamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDÃO, V. L. *et al.* Utilização do Soro de Mandioca como Substrato Fermentativo para a Biosíntese de Goma Xantana: Viscosidade Aparente e Produção, 2010

BRITO, E. E. F. Análise da Trajetória de Poços Horizontais em Reservatório de Óleo Pesado, Dissertação (Mestrado), Natal, RN 2008

CASAS, J.A.; SANTOS, V.E.; GARCIA-OCHOA, F. Xanthan gum production under several operational conditions: molecular structure and rheological properties. *Enzyme and Microbial Technology*, v.26, n.2-4, p.282-291, 2000.

CHHABRA, R. P. Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Fluids. 2. ed. United States of America, Ed. CRC Press, 2007

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications. 2. ed. Hungary, Ed. Butterworth-Heinemann, 2008

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos, 5ed, ed LTC, 2001

COMMITTEE, A. S. S. Drilling Fluids Processing Handbook, United States of America, Elsevier, 2005

GUIMARAES, I. B.; ROSSI, L. F. S. Estudo dos Constituintes dos Fluidos de Perfuração: Proposta de uma Formulação Otimizada e Ambientalmente Correta, 4º PDPETRO, Campinas, SP, 2007

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETROLEO E GAS, Agenda Prioritária da Indústria de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – ano 2104/2015, 2015

JAHN, F.; COOK, M.; GRAHAM, M. Hydrocarbon exploration and production. *Developments in Petroleum, Science United Kingdom*, v. 46, Ed. Elsevier, 2003

JIAO, D.; SHARMA, M. M. Investigation of Dynamic Mud Cake Formation: The Concept of Minimum Overbalance Pressure. Society of Petroleum Engineers, p. 79-90, Texas, Houston 1993

MACHADO, J. C. V. Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2002

MARTINS, A. B.; FERREIRA, H. S.; FERREIRA, H. C.; NEVES, G. A. Desenvolvimento de argilas bentoníticas organofilizadas para uso em fluidos não aquosos de baixo conteúdo aromático. 4º PDPETRO, Campinas, SP, 2007

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados, 2 ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.

MOREIRA, B. A. Estudo da sedimentação em suspensões de fluidos com características reológicas pseudoplásticas Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, UFU, Uberlândia, 2014

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7ª ed, McGraw-Hill, 1997

PETROBRAS, Manual de Fluidos/Engenharia de Poço. 1ª ed, Rio de Janeiro, Petrobras, 2011

PETROBRAS, Plano de estratégico e Plano de Negócios e Gestão 2017-2021, 2016

SANTOS, N. B. C. Estabilidade de Suspensões Pseudoplásticas Utilizadas na Perfuração de Poços de Petróleo, Dissertação (Mestrado), Uberlândia, MG 2017

SANTOS, B. S. Perfuração de poços de petróleo: fluidos de perfuração. Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense v. 2, n. 1, p. 121-127, 2012

SCHAFFEL, S. B. A questão ambiental na etapa de perfuração de poços marítimos de óleo e

gás no Brasil. Dissertação (Mestrado) COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 2002

SILVA, L. A.; FERRAZ, A. S. F. S.; CALÇADA, L. A.; SCHEID, C. M. Determinação das Propriedades da Torta Obtida na Filtração de Fluidos de Perfuração XXXVII ENEMP Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, 2015

SUTHERLAND, I. W. - “*Xanthan*”, *in*: Xanthomonas, Swings, J. G. & Civerolo, E. L. (eds.), Chapman & Hall, London (1993)

THOMAS, J. E. - “Fundamentos de Engenharia de Petróleo”, Interciência, Rio de Janeiro (2001)

WILKES, J. O. Fluid Mechanics for Chemical Engineers with Microfluidic sand CFD. 2. ed., United States of America, Ed. Pretice Hall Professional Technical Reference, 2006