

# DESLOCAMENTO DE FLUIDOS NEWTONIANOS EM POÇOS DE PETRÓLEO HORIZONTAIS NÃO RETILÍNEOS

**Alunos: Marcelo Lopes de Albuquerque e Rafael Alberto Valpaços de Lemos Leal**  
**Orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes**

## 1- Introdução

### 1.1- Descrição do Problema

Operações que envolvem a substituição de um fluido por outro são freqüentes em diversos processos tecnológicos, científicos e naturais, dentre as quais se destacam a separação química de fases, o revestimento interno de tubulações, o transporte de substâncias na indústria alimentícia, assim como o escoamento de emulsões biológicas nos seres vivos. É na indústria do petróleo, contudo, que o estudo do deslocamento de fluidos encontra uma de suas aplicações mais imediatas e relevantes, especialmente no que se refere a importantes etapas da perfuração e prospecção de poços.

Caracterizando-se por escoamentos multi-fásicos, tais processos geram a necessidade de se determinar a miscibilidade dos fluidos, ou seja, definir o mecanismo de difusão, para fluidos miscíveis, ou a tensão superficial na interface comum, para os imiscíveis. Dessa maneira, percebemos que uma boa compreensão da forma e estabilidade da interface entre dois fluidos é de suma importância a fim de se controlar e maximizar a eficiência nesses casos. Outros fatores que podem influenciar esse tipo de procedimento são os eventuais efeitos de capilaridade, decorrentes da geometria dos tubos, e as próprias características reológicas dos fluidos utilizados.

Com relação a reologia, um dos fenômenos observados durante o deslocamento de um fluido de maior por outro de menor viscosidade é a instabilidade de Saffman-Taylor, também conhecida como “*viscous fingering*”. Ela se caracteriza pela desestabilização da interface comum, que cresce pela interpenetração do fluido menos viscoso em formato de dedos. Para o procedimento inverso, a interface é estável.

Esse fenômeno pode ocasionar sérios prejuízos econômicos na indústria petroquímica, pois gera ineficiência na substituição de um fluido por outro, geralmente em operações complexas e bastante custosas. Dentre tais operações, podemos destacar duas em especial: a recuperação secundária e a cimentação dos poços de petróleo.

Os métodos de recuperação secundária envolvem a injeção de fluidos através de poços auxiliares, como forma de deslocar o petróleo ainda remanescente no reservatório, quando a pressão deste se equilibra com a pressão do fundo do poço. O processo de substituição do petróleo pelo líquido injetado ocorre, portanto, em meios porosos, onde se evidenciam efeitos de capilaridade, exigindo um estudo bastante detalhado dos mecanismos presentes. Além desses, outros parâmetros interferem na interação entre os fluidos e, conseqüentemente, na eficácia do processo em si, como o número de Reynolds, a razão de viscosidades e a razão de densidades entre as substâncias utilizadas.

Por outro lado, a cimentação, operação na qual basearemos nossa simulação experimental e que será foco de nosso estudo, ocorre imediatamente após a perfuração do poço de petróleo. Durante a perfuração se faz preciso um constante resfriamento e lubrificação da coluna de perfuração e da broca, assim como uma remoção contínua do cascalho e de outros detritos provenientes dessa atividade. Para suprir essa necessidade, utilizam-se fluidos de perfuração, que também atuarão como uma coluna hidrostática capaz de

evitar o colapso do poço durante os procedimentos seguintes e o influxo precipitado de óleo, gás ou água.

Os líquidos não newtonianos viscoplásticos, descritos mais adiante, são perfeitos para tal função, já que apresentam alta viscosidade em contato com as pequenas partículas de detritos, onde a taxa de cisalhamento é baixa, permitindo o carregamento, e baixa viscosidade em contato com as paredes do poço, onde a taxa de cisalhamento é alta, possibilitando a redução da potência de bombeamento. Assim sendo, a lama de perfuração é injetada para o interior da coluna de perfuração, retornando à superfície através do espaço anular formado entre essa e a formação rochosa da parede do poço.

Como os poços são perfurados em fases, que dependem essencialmente das características geológicas das zonas perfuradas e da profundidade final a ser alcançada, devemos conhecer as pressões envolvidas em cada etapa e otimizar a vazão de injeção do líquido, sua capacidade de remoção de sólidos e o dimensionamento dos jatos de broca. Dessa maneira, cada fase perfurada requer o conhecimento e controle de diversos parâmetros do fluido de perfuração, tais como sua densidade e suas propriedades reológicas.

Uma vez que se atinge a profundidade desejada em cada etapa, o poço se encontra totalmente preenchido com a respectiva lama de perfuração, tanto no que se refere ao interior da coluna, quanto ao espaço anular anteriormente citado. A fim de possibilitar o início da produção ou a continuação do processo de perfuração, caso estejamos em um estágio intermediário, torna-se necessária a cobertura da parede do poço com uma pasta de cimento, cujas funções principais são garantir a estabilidade estrutural da formação e prevenir a infiltração de fluidos indesejáveis, muitas vezes corrosivos, e que poderiam danificar a coluna de revestimento.

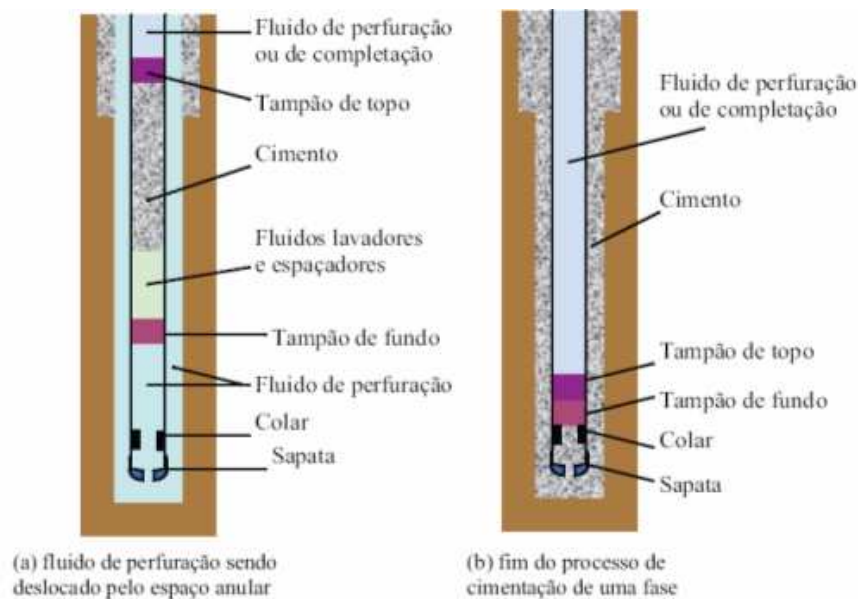


Figura 1 – Esquema do Processo de Cimentação Primária

A cimentação primária, também chamada cimentação principal, pode ser ilustrada esquematicamente pela figura 1 [3, 10, 35, 72]. O processo se inicia com a retirada da coluna de perfuração do poço, que se mantém estável através da pressão exercida pelo fluido de perfuração sobre suas paredes, e sua substituição pela coluna de revestimento de aço, cujo diâmetro é menor do que o da broca. Em seguida, o tampão de fundo, acessório que contém uma membrana fina de baixa resistência em sua parte central, é lançado na coluna de revestimento.

O cimento é, então, misturado com água, formando uma pasta não newtoniana viscoplástica. Da mesma forma que os fluidos de perfuração, tais pastas precisam ter propriedades bem definidas e controladas, adequando-se aos variados tipos de revestimento e formações. Antes do cimento, todavia, fluidos intermediários, também chamados “colchões” lavadores e espaçadores, devem ser injetados no poço.

Enquanto os primeiros têm como finalidade auxiliar na remoção da lama de perfuração, preparando a região de interesse para uma melhor aderência do cimento, os segundos procuram minimizar o contato entre os fluidos principais, evitando a contaminação da pasta de cimento. Mais uma vez, as propriedades desses fluidos devem ser analisadas para que não haja incompatibilidade com o líquido a ser deslocado, nem com o deslocador.

Após os “colchões” lavadores e espaçadores, uma ou mais pastas de cimento são bombeadas e, uma vez atingido o volume desejado, o tampão de topo, formado por uma borracha rígida, é lançado. O cimento escoou pela coluna de revestimento através do bombeio, atrás do tampão de topo, da lama de perfuração, no caso de estágios intermediários, ou da lama de completação, no caso da última etapa de perfuração.

Com a movimentação da pasta, os fluidos intermediários são deslocados e empurram o tampão de fundo até este encontrar o colar redentor ou flutuante, peça existente no final da coluna de revestimento. Nesse instante, a membrana é rompida, permitindo a passagem dos fluidos lavadores e espaçadores, seguidos pela pasta de cimento, que atravessam a sapata seguindo para o espaço anular.

O processo se finaliza quando o tampão de topo encontra o tampão de fundo, gerando um aumento de pressão na superfície. Nesse momento, o cimento localiza-se na coluna de revestimento apenas abaixo do colar flutuante e preenche todo o espaço anular. No restante da coluna, encontramos apenas o fluido de perfuração ou de completação, conforme os casos já citados.

Após a pega do cimento, uma coluna com broca é descida para cortar as partes internas dos acessórios e condicionar o revestimento do poço. Em havendo prosseguimento da perfuração, o cimento residual entre o colar e a sapata também é perfurado. Na figura seguinte [57], podemos observar uma ilustração em corte de um poço direcional cimentado:



Figura 2 – Ilustração em Corte de um Poço Direcional Cimentado

A perfuração direcional consiste no desvio intencional da trajetória de um poço [72]. Dessa maneira, os poços podem ser não somente verticais, mas também inclinados e, até mesmo, horizontais. Tendo como objetivo atingir reservatórios que não se encontram diretamente abaixo

da localização superficial do poço, essa técnica permite perfurar poços de alívio e de longo alcance, desviar a coluna de perfuração de acidentes geológicos, assim como garantir uma maior exposição ao reservatório alvo, aumentando a produção. Na figura a seguir, podemos observar alguns desses exemplos:

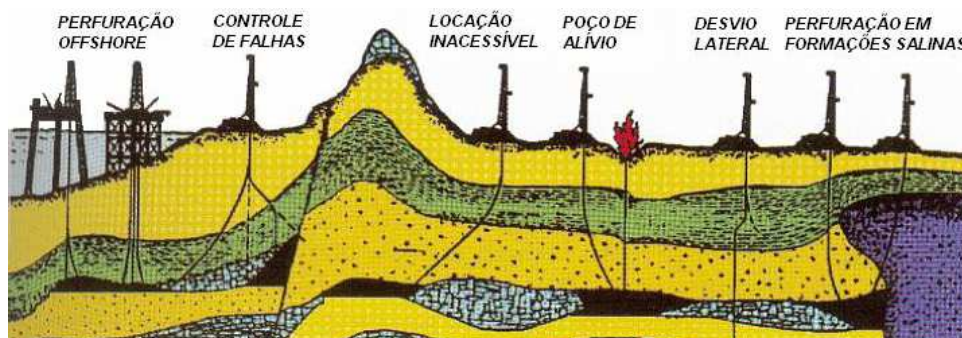


Figura 3 – Exemplos de Perfuração Direcional [59]

Uma vez completada a cimentação, sua qualidade é avaliada geralmente através de perfis acústicos corridos pelo interior do revestimento. Se forem verificadas falhas no resultado, pode se fazer necessária a realização de uma cimentação secundária, processo denominado tamponamento. Tal procedimento consiste na injeção de mais pasta de cimento no poço, objetivando corrigir localmente a cimentação primária e vazamentos do revestimento. O tamponamento é ainda utilizado em operações de abandono definitivo ou temporário do poço.

Claramente podemos perceber que as operações de cimentação, tanto primárias, quanto secundárias, são diretamente influenciadas pela geometria do poço. A eficiência do deslocamento dos diversos fluidos envolvidos certamente depende tanto das dimensões do poço, como a folga do espaço anular e sua excentricidade, quanto do seu posicionamento em relação à gravidade, relacionado à sua inclinação. Assim, a relativamente recente técnica da perfuração direcional, desenvolvida a partir da necessidade de se prospectar petróleo em camadas cada vez mais profundas, é um fator de extrema relevância que interfere nessa importante atividade petrolífera.

Além disso, obviamente, qualquer poço, seja ele vertical, inclinado ou horizontal, não apresenta um perfil em corte longitudinal perfeitamente retilíneo. As irregularidades são resultantes da variação da composição geológica das regiões perfuradas e da própria dificuldade latente de se manter a broca em uma direção perfeitamente definida. Sendo assim, as sinuosidades verificadas ao longo do poço dificultam ainda mais o processo de cimentação, não podendo ser desprezada o seu impacto sobre o deslocamento dos líquidos.

## 1.2- Motivação

A cimentação, como podemos verificar, é uma das etapas fundamentais da engenharia de poços de petróleo, exercendo um papel essencial na sua vida produtiva [53]. Erros nesse processo podem prejudicar a vedação hidráulica e a estabilidade estrutural do poço, aumentando os riscos de danos ambientais e prejuízos econômicos. Grande parte dessas falhas devem-se a má aderência do cimento à formação rochosa ou à coluna de revestimento, resultantes da contaminação da pasta ou da presença de resíduos do fluido de perfuração não devidamente deslocados pelos “colchões” lavadores e espaçadores.

Através do exposto anteriormente, surgem inúmeras questões pertinentes no que tange à obtenção de melhores resultados nos procedimentos de cimentação. A contaminação da pasta de cimento pela lama de perfuração pode ser evitada conhecendo-se o volume mínimo de fluidos intermediários capaz de impedir o contato entre os líquidos principais. Da mesma

forma, a manutenção de uma interface plana e estável, que minimize os resíduos do fluido deslocado ao final do processo, pode ser alcançada conhecendo-se a vazão de bombeamento e as características mecânicas dos fluidos que aumentam a eficiência da substituição.

Em contrapartida, existem diversos fatores que concorrem para dificultar a completa ocupação pelo cimento da região anular entre a rocha e a coluna de revestimento. Podemos citar, primeiramente, a excentricidade da coluna, que gera um desbalanceamento e assimetria no perfil de velocidades, favorecendo a canalização do fluido deslocador sobre o deslocado na região mais larga do anular. Outro exemplo seria a diferença entre as densidades dos pares de fluidos, o que pode levar a uma estratificação dos líquidos em poços inclinados e, em especial, nos horizontais.

Um outro parâmetro capaz de afetar a interação entre os fluidos são as suas propriedades reológicas. No processo de cimentação, apenas o “colchão” lavador apresenta comportamento newtoniano, por ser uma simples mistura de água com detergentes em concentrações suficientemente baixas para não modificar suas características mecânicas. Todos os outros fluidos, a saber, a lama de perfuração, o fluido espaçador e a pasta de cimento, apresentam comportamento não newtoniano, ou seja, suas viscosidades variam em função da taxa de deformação.

Detalhando um pouco mais a classificação reológica desses fluidos não newtonianos, podemos apresentar a lama de perfuração e a pasta de cimentação como viscoplásticos. Isso significa que tais fluidos se comportam como líquidos de altíssima viscosidade quando submetidos a pequenas deformações ou tensões, observando-se uma queda brusca assim que uma tensão limite é aplicada. Enquanto a tensão imposta for aumentando, a viscosidade continuará a cair, seguindo uma lei de potência, ou, no termo em inglês, *power-law*. Por outro lado, os “colchões” espaçadores apresentam um comportamento pseudoplástico, já que, apesar da viscosidade diminuir com o aumento da tensão aplicada através de uma lei de potência, não se verifica uma tensão limite que determine o início do escoamento.

Ainda com respeito a reologia das substâncias empregadas, a experiência da indústria do petróleo e os estudos anteriores na área nos indicam que a razão de viscosidades é um dos aspectos que exerce a maior influência sobre a qualidade da cimentação, tornando-se essencial defini-la corretamente. Para tanto, devemos utilizar as equações constitutivas que melhor descrevem as características dos fluidos envolvidos, assim como realizar aferições corretas de suas propriedades, especialmente no que se refere à viscosidade.

Visto que o comportamento mecânico dos fluidos não newtonianos é função da cinemática do escoamento, torna-se necessário estabelecer *a priori* a natureza do deslocamento. No caso de geometrias anulares, como no problema aqui tratado, a cinemática é eminentemente cisalhante. De posse desse conhecimento e sabendo que os inúmeros modelos constitutivos dos fluidos viscoplásticos e pseudoplásticos têm equações puramente algébricas, apesar de não lineares, pode-se iniciar o tratamento e implementação da análise do processo.

Percebemos, entretanto, que os diversos fatores que impactam na cimentação tornam muito mais complexa uma previsão confiável da eficiência do procedimento. Apesar disso, essa análise torna-se cada dia mais indispensável, haja vista o crescimento das pressões pela preservação do meio ambiente e pela redução dos custos operacionais em um setor que envolve enormes volumes financeiros.

Com relação especificamente aos poços horizontais, a situação torna-se ainda mais crítica. De acordo com o *Journal of Petroleum Technology – JPT* [43], esse tipo de poço já representa aproximadamente de 10% a 15% das atividades de exploração, possuindo um custo cerca de três vezes maior que o de um poço vertical. Como, por outro lado, o seu emprego pode fazer com que a produção de petróleo seja aumentada em até vinte vezes, tudo indica que o número desses poços no mundo continue o seu vertiginoso crescimento, observado no gráfico da figura 4.

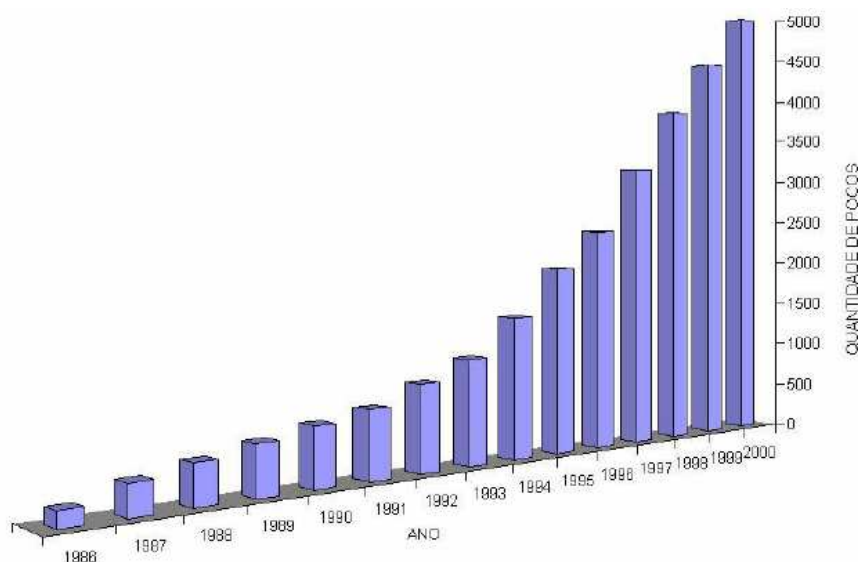


Figura 4 – Evolução Anual do Número de Poços Horizontais [43]

Sabendo que, atualmente, o petróleo responde por mais de 60% da energia primária consumida no mundo e é matéria prima de uma enorme variedade de produtos como remédios, plásticos, alimentos e insumos petroquímicos [78, 79], não se pode negar o peso dessa indústria sobre a economia mundial. Além disso, como combustível fóssil não-renovável que tenderá a se tornar cada vez mais escasso, o investimento em exploração de reservatórios em águas ultraprofundas e ambiente inóspitos é uma premissa fundamental a fim de se evitar um colapso resultante do descompasso entre a demanda e a oferta.

A necessidade de se aumentar a eficiência no setor petrolífero tornou-se ainda mais proeminente com o agravamento da crise financeira mundial que se estabeleceu a partir do segundo semestre de 2008, reduzindo drasticamente o preço do barril de petróleo. Diversos investimentos em tecnologias avançadas e na exploração de volumes de difícil acesso, como as reservas do pré-sal na costa brasileira, para as quais os poços horizontais são uma alternativa interessante, se tornaram praticamente inviáveis economicamente e só poderão se concretizar com uma redução substancial dos custos envolvidos.

Surpreendentemente, mesmo diante de todas essas informações, poucos estudos a respeito da perfuração de poços horizontais podem ser encontrados na literatura científica e tecnológica. A carência de trabalhos é ainda maior quando se trata dos reflexos do aspecto não retilíneo dos poços sobre os procedimentos de cimentação. Dessa maneira, existe, ainda, um vasto campo de pesquisas que esta obra pretende explorar.

### 1.3- Objetivos

Com o objetivo de contribuir para a otimização do uso dos recursos materiais e financeiros empregados, esse projeto visa obter uma melhor compreensão da substituição de fluidos durante a cimentação de poços horizontais, sem desconsiderar a influência de irregularidades nos seus perfis longitudinais. Dessa maneira, nossa pesquisa pretende determinar algumas condições que proporcionam uma melhor remoção do fluido de perfuração e dos fluidos intermediários e, conseqüentemente, uma melhor aderência da pasta de cimento.

Para este estudo, foi construída uma bancada experimental a fim de realizarmos simulações das operações de deslocamento de um fluido por outro no espaço anular de um poço horizontal sinuoso. Em nossos testes, utilizamos apenas fluidos newtonianos, por motivos a serem posteriormente explicados, e nos concentramos na razão de viscosidades como parâmetro de interesse do problema.

A eficiência da operação foi por nós avaliada qualitativamente através da massa de fluido deslocado remanescente no espaço anular ao final do processo e, principalmente, da forma e comportamento da interface entre os líquidos, dado que interfaces planas e estáveis implicam em uma melhor performance. A figura 5 [29] a seguir ilustra duas possibilidades opostas da aparência da fronteira de deslocamento, onde perfis mais acentuados sugerem o atravessamento indesejável do fluido deslocador através do deslocado:

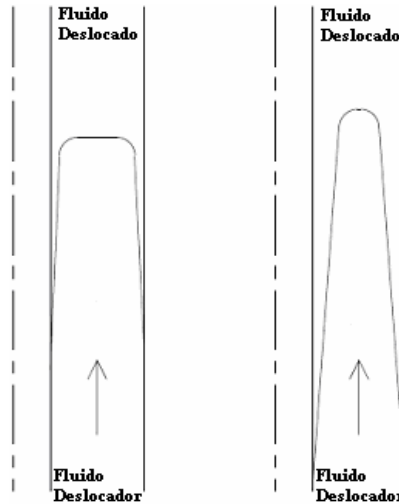


Figura 5 – Interfaces Características de Deslocamento de Fluidos

Em termos práticos, executamos testes de visualização para quatro razões de viscosidades diferentes em deslocamentos de um líquido por outro de mesma densidade, observando a forma e estabilidade da interface e o aspecto final da substituição. De maneira a traduzir quantitativamente nossa análise, estabelecemos, ainda, uma relação entre as razões de viscosidades estudadas e um indicador da qualidade da remoção do fluido deslocado, que discutiremos mais à frente.

## 2- Revisão Bibliográfica

Devido às inúmeras aplicações em importantes atividades científicas e tecnológicas, o escoamento de fluidos miscíveis e imiscíveis em tubos apresenta grande destaque e extensa literatura no campo da Mecânica dos Fluidos. No entanto, conforme citado anteriormente, a investigação da interface de deslocamento entre fluidos em um espaço anular de um caminho horizontal não retilíneo ainda é um assunto pouco explorado.

Neste capítulo, apresentamos, de forma concisa, alguns trabalhos e suas respectivas conclusões, que estejam, de alguma forma, relacionados ao escopo de nosso estudo. Buscamos mencionar desde publicações básicas que tratam os processos de deslocamento de fluidos em diferentes geometrias até aquelas mais específicas sobre a substituição de líquidos em anulares na indústria do petróleo. A seguir, os referidos trabalhos:

A fim de investigar o escoamento de água em torno de objetos e explorando o fato de que a equação que governa o deslocamento se assemelha à Equação de Euler, o arquiteto Henry Selby Hele-Shaw, em 1898, projetou uma célula, batizada com o seu nome. Esse aparato consistia em duas placas planas com 300mm de largura separadas por 1mm de distância, a qual era preenchida por um fluido, que era posteriormente deslocado por outro, injetado pela entrada da célula.

Lançando mão desse dispositivo, diversos autores, tais como Yamamoto *et al.* [74, 75, 77], Chevalier *et al.* [18], Amar *et al.* [2], Lindner *et al.* [46, 47], realizaram pesquisas sobre

deslocamento em meios porosos. O foco principal desses trabalhos era o estudo, em escoamentos bidimensionais, da instabilidade de Saffman-Taylor ou “*viscous fingering*”.

O interesse pela análise do escoamento de fluidos recebeu um grande impulso com uma publicação dos pioneiros Fairbrothers e Stubbs [30], em 1935, que tratava da remoção de fluidos newtonianos em tubos através da injeção de gás. Em tal trabalho, foi medida a fração de massa  $m$  depositada nas paredes do tubo e, então, proposta uma relação entre esta, a velocidade da interface  $U$  e a velocidade média do escoamento  $\bar{u}$ , do tipo  $m = (U - \bar{u})U^{-1}$ . Além disso, como resultado empírico, também foi apresentada uma relação associando  $m$  ao parâmetro adimensional de capilaridade, a saber,  $m = Ca^{0.5}$ , onde  $Ca = \mu U \sigma^{-1}$ , sendo  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $\sigma$  a tensão superficial.

Já em 1960, Taylor [67, 68] publicou um resultado experimental referente ao processo de remoção de fluidos newtonianos em geometrias capilares horizontais. Ele observou que ocorria um aumento do percentual de massa do líquido deslocado remanescente na parede até um valor assintótico de 0,56 conforme  $Ca$  atingia um valor máximo de 2. Comparando seus dados com os obtidos pelos pioneiros Fairbrothers e Stubbs [30], o autor verificou que a equação proposta por eles só era válida para números de capilaridade na faixa  $0 < Ca < 0,09$ .

Nesse mesmo ano, Bretherton [12] estudou o deslocamento de longas bolhas de ar ao longo de tubos capilares preenchidos com líquidos viscosos. A abordagem teórica e experimental foi dividida em dois problemas distintos, sendo o primeiro aquele em que o tubo possuía um raio suficientemente pequeno, tal que esforços gravitacionais podiam ser desprezados, e o segundo aquele em que se analisava o escoamento das bolhas em tubos verticais com uma das extremidades seladas. O autor encontrou uma relação teórica para a fração de massa remanescente na parede do tubo válida para baixos números de capilaridade, corroborada pelos experimentos.

Dois anos mais tarde, Cox [21] expandiu a gama de números de capilaridade analisados, observando uma boa concordância com as conclusões obtidas por Bretherton [12], para  $0,001 < Ca < 0,01$ . Além disso, ele observou que a fração mássica depositada na parede do tubo, na verdade, tinha como assíntota 0,60, a medida em que  $Ca$  tendia a 10.

Goldsmith e Mason [36], em 1963, analisaram teórica e experimentalmente a quantidade de líquido depositada na parede devido ao deslocamento de uma gota de líquido viscoso. Os pesquisadores demonstraram, então, que essa fração de massa aumentava de acordo com a diminuição da razão de viscosidades  $N_\mu = \mu_1/\mu_2$ , onde  $\mu_1$  é a viscosidade do fluido deslocador e  $\mu_2$  é a viscosidade do fluido deslocado.

No ano seguinte, Cox [22] iniciou um trabalho de visualização de linhas de corrente, a fim de checar a validade dos padrões propostos anteriormente por Taylor [67, 68]. A conclusão obtida foi de que esses só podem ser confirmados para casos extremos, ou seja,  $Ca \gg 1$  ou  $Ca \ll 1$ , sem que se pudesse prever nenhum padrão de transição. Além disso, o estudo contemplou uma conclusão interessante: a bolha provocava apenas uma perturbação local no escoamento, sendo a mesma da ordem de  $1,5D$ , onde  $D$  é o diâmetro do tubo.

Brice e Holmes [13], em 1964, realizaram estudos experimentais do deslocamento da lama de perfuração pelo cimento em regime turbulento, em 26 poços. Enquanto para lamas base água obteve-se resultados satisfatórios, para outros tipos a incompatibilidade dos fluidos intermediários prejudicou o procedimento, levando à invenção de novos espaçadores. Os autores perceberam também ser necessário um controle cuidadoso da vazão e do volume de bombeamento, garantindo um tempo de contato mínimo entre os fluidos, o que só pode ser conseguido com regime turbulento.

Já no ano de 1973, Clark e Carter [19] apresentaram um interessante artigo. Eles perceberam que, para uma mesma perda de carga no anular, a lama de perfuração que escoava

em regime turbulento em parte da seção fornece uma melhor eficiência de deslocamento do que aquela em regime laminar.

Com relação a aspectos de aplicabilidade mais imediata, Carney [14], em 1974, publicou um trabalho no qual defendia fortemente a utilização de fluidos espaçadores nas operações de cimentação de poços de petróleo. Ali ele destacou alguns critérios básicos para a escolha do melhor fluido “colchão”, como, por exemplo, ser compatível com todos os fluidos de perfuração; não interferir demasiadamente na viscosidade e no tempo de bombeamento da mistura de cimento; permitir aumentos da densidade, a remoção de detritos e a adição de agentes redutores de fricção, dispersantes, retardadores e umectantes; possuir baixa perda de fluido por infiltração na parede da formação; permitir regimes turbulentos a baixas taxas de bombeamento, facilitando a remoção da lama de perfuração; entre outros.

No ano de 1977, Beirute e Flumerfelt [5] desenvolveram uma modelagem matemática para descrever o deslocamento da lama de perfuração por misturas de cimento em regimes de escoamento laminares. Esse modelo permitia obter uma combinação de variáveis, como, por exemplo, densidade, viscosidade, tensão de escoamento, taxa de deslocamento, dentre outras, para as quais a substituição era otimizada. Os autores afirmaram que, tanto em regime laminar quanto em regime turbulento, é possível obter bons resultados, desde que as substâncias sejam selecionadas de maneira adequada. Além disso, o modelo indicava que a tensão limite de escoamento é crítica no surgimento de *channeling* do cimento através do fluido de perfuração, mostrando que tal fenômeno ocorre quando a tensão limite de escoamento deste último é consideravelmente menor do que a do primeiro.

Um ano mais tarde, em um de seus estudos, Haut [39] destacou que existem três tipos distintos de regime de escoamento nos quais fluidos não newtonianos podem ser classificados: laminar, turbulento e *plug flow*. O autor concluiu que o perfil de velocidade no regime laminar não é tão uniforme em torno do anular quanto nos regimes *plug flow* ou turbulento. Além disso, ele mostrou que os efeitos da densidade não podem ser desprezados, já que é exatamente a diferença das densidades do fluido de perfuração e da pasta de cimento que gera a instabilidade na interface entre os mesmos.

Abrem-se, aqui, parênteses para salientar que não se deve confundir o perfil de velocidade com o perfil da interface num processo de deslocamento entre fluidos. O perfil de velocidade precisa ser analisado longe da fronteira dos fluidos e admite as formas ilustradas na figura 5, não variando com o tempo em regime permanente. Já na região fronteira, o perfil varia bastante, devido a instabilidades e recirculações, não podendo ser desprezada a componente da velocidade na direção radial.

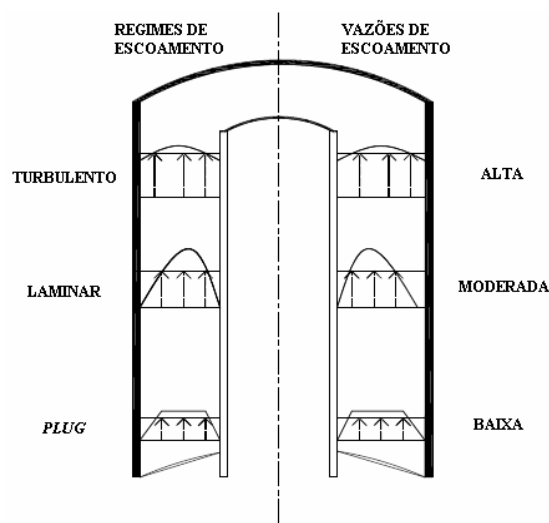


Figura 6 – Regimes e Perfis de Escoamento [29]

No mesmo ano de 1978, Martin, Latil e Vetter [52] determinaram a condição ideal para os processos de cimentação. A partir de dados experimentais, os pesquisadores desenvolveram um modelo matemático para equacionar o problema através de algumas aproximações, semelhantes às realizadas em escoamentos multi-fásicos em meios porosos, mas levando em consideração o comportamento tixotrópico dos fluidos em estudo.

Em 1979, Haut e Crook [40] analisaram a influência de diversos fatores no deslocamento de fluidos durante o processo de cimentação. Segundo eles, a velocidade imposta no anular é um parâmetro primordial e a eficiência da operação é afetada, também, por características reológicas, diferenças de densidade, dentre outros. Além disso, foi assinalado que a substituição era favorecida pelo aumento da vazão da pasta de cimento. Dois anos mais tarde, Haut e Crook [41] verificaram em laboratório que espaçadores de baixa densidade e viscosidade melhoravam a remoção da lama de perfuração.

Em 1982, Graves e Colins [37] realizaram um estudo numérico do deslocamento de fluidos não newtonianos. Lançando mão de uma nova formulação matemática e sabendo que os líquidos analisados tinham comportamento viscoplástico, foi possível encontrar uma nova equação constitutiva variante do modelo anteriormente proposto por Bingham, com o uso do método de diferenças finitas. Finalmente, os dois observaram que, para o caso em que o fluido deslocador possuía uma tensão limite menor do que a do fluido deslocado, ocorriam instabilidades no fluxo, culminando com uma interface irregular e ondulada e com o aparecimento de vórtices próximos à parede do tubo.

Já em 1987, Sauer [60] publicou um artigo no qual eram discutidos pontos importantes concernentes à cimentação primária. Dentre os principais tópicos, podemos destacar a circulação para o condicionamento do poço, a escolha de “colchões” espaçadores, a centralização da coluna de revestimento e a velocidade de descida da mesma. Com relação à seleção dos fluidos espaçadores, o autor concluiu que esta deve levar em conta, entre outros aspectos, a vazão de injeção, a reologia, a densidade e a compatibilidade físico-química entre as substâncias utilizadas.

Ainda nesse ano, Luo e Peden [50] apresentaram um método mais preciso para a análise de escoamentos em anulares excêntricos, tratados como concêntricos, infinitos e com raio externo variável. Os resultados mostraram que os perfis de velocidade e tensão cisalhante não apresentam simetria radial e que a magnitude dessas grandezas aumenta quando a seção transversal é maior.

Em 1988, Debbaut e Crochet [26] investigaram, o comportamento de fluxos em geometrias complexas. Os experimentos utilizaram fluidos viscoplásticos e foram realizados em uma planta com uma contração abrupta 4:1. Ao final do trabalho, foi concluído que o efeito do primeiro coeficiente de tensões normais no tamanho dos vórtices gerados é oposto ao que se observa variando a razão entre a viscosidade extensional e a de cisalhamento (ambos mantidos à mesma taxa de deformação  $\dot{\gamma}$ ).

A fim de determinarem o modelo reológico que melhor descreve os fluidos de perfuração, Silva *et al.* [63] executaram, em 1989, um experimento em escala real. Foram testados os modelos de Bingham, *power-law*, Casson e Herschel-Bulkley, no escoamento anular de líquidos base água e base óleo. Nas sete lamas de perfuração estudadas, realizaram-se medições da vazão volumétrica e da queda de pressão, para verificação dos modelos.

Ainda em 1989, Lockyear e Hibbert [48] utilizaram modelos matemáticos e experimentais para analisar o escoamento de líquidos em seções anulares. Eles concluíram que o deslocamento do fluido de perfuração é facilitado por lamas com baixa força-gel, pelo bom *stand-off* (descentralização) do revestimento e por elevadas vazões de injeção. Já a colocação do cimento é auxiliada por *stand-off* adequados, espaçadores menos viscosos que o primeiro e pastas com tensão limite de escoamento.

Couturier, Guillot, Hendriks e Callet [20], em 1990, debateram alguns critérios para melhorar a eficiência de deslocamento da lama de perfuração. Eles reforçaram a necessidade de uma criteriosa seleção dos fluidos espaçadores, mostrando um paralelo entre amostras preparadas em laboratório e fluidos obtidos em campo. O estudo contemplou, ainda, uma discussão sobre a influência da excentricidade no processo de cimentação.

Naquele ano, Lockyear *et al.* [49] estudaram as condições para uma correta disposição do cimento no poço. Eles citaram que devem ser superadas a força de gel e a tensão limite de escoamento da lama, possibilitando sua movimentação para a seção larga do anular, e que a canalização pode ser minimizada por mecanismos de fluviabilidade (empuxo) e controlando o *stand-off* do revestimento. Além disso, foi destacado que o aumento da vazão diminui o grau de canalização, pelo aumento da perda de carga por fricção. Portanto, fluidos menos viscosos seriam mais eficazes no deslocamento de fluidos mais viscosos, já que entram com maior facilidade em regime turbulento.

No ano seguinte, Jakobsen *et al.* [42] construíram um aparato experimental com o intuito de simular um poço. Tal montagem permitia a variação da excentricidade do anular, além de poder ser inclinada de 0° a 90°. Os resultados obtidos com a planta ajustada para uma excentricidade de 55% e uma inclinação de 60° indicaram que a eficiência de substituição é incrementada à medida que a densidade do fluido deslocador aumenta em relação à do fluido deslocado. Paralelamente, os pesquisadores concluíram que regimes turbulentos reduzem a tendência ao fenômeno de *channeling* na região mais baixa e estreita do anular e que a reologia do fluido deslocado afeta consideravelmente a intensidade dessa turbulência.

Em 1992, Tehrani, Ferguson e Bittleston [69] realizaram uma abordagem teórica e experimental continuando as investigações sobre o assunto, através da variação de parâmetros de serviço, tais como a inclinação, a excentricidade, a vazão e as propriedades mecânicas dos fluidos empregados. Eles observaram que a qualidade do deslocamento é tão menor quanto mais estreita é a região do anular, maior é a excentricidade ou menor é a diferença entre as densidades dos fluidos (desde que o fluido deslocador apresente densidade maior). Foi demonstrado, também, que a eficiência é pouco influenciada pela inclinação, atingindo seu maior valor com a planta na posição vertical, mas que é proporcional à diminuição da vazão e à maior magnitude da tensão limite de escoamento do fluido deslocador em relação à do deslocado.

No mesmo ano, Olbricht e Kung [56] publicaram um trabalho sobre o formato, a deformação e a quebra de uma gota que escoava por um tubo capilar. Vale lembrar que, nos casos estudados, a gota possuía a mesma ordem de grandeza dimensional do diâmetro do tubo. Dessa maneira, os autores concluíram que, quando a viscosidade do fluido da gota é menor do que a viscosidade do fluido externo à mesma, ocorre à penetração deste na parte traseira da gota, ao longo do eixo. O caso oposto, no qual a razão de viscosidades é grande, gerou uma gota alongada na direção axial.

Três anos mais tarde, em 1995, Kelessidis *et al.* [44] apresentaram dados de uma criteriosa análise de processos de cimentação realizados em campo. A pesquisa monitorou diversos parâmetros de serviço, entre eles, a taxa de bombeamento, as pressões, as densidades e as propriedades reológicas dos fluidos envolvidos.

Um ano depois, Petitjeans e Maxworthy [58] investigaram experimentalmente o deslocamento de fluidos miscíveis em tubos. Para tanto, verificaram o impacto de alguns fatores sobre a parcela de massa depositada nas paredes, a saber: a razão de viscosidades; o número de Peclet, dado por  $Pe = V_m D / D_d$ , onde  $V_m$  é a velocidade máxima do escoamento,  $D$  é o diâmetro do tubo e  $D_d$  é o coeficiente de difusão médio do escoamento; e a relação entre as forças viscosas e as forças de corpo, através do parâmetro  $F = (g(\rho_1 - \rho_2)D^2) / (\mu_2 V_m)$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho_1$  é a massa específica do

fluido deslocador,  $\rho_2$  é a massa específica do fluido deslocado,  $D$  é o diâmetro do tubo,  $V_m$  é a velocidade máxima do escoamento e  $\mu_2$  é a viscosidade do fluido deslocado. Como conclusão, observou-se que a fração mássica depositada no tubo diminuiu com a redução da razão de viscosidades e que, para elevados valores do número de Peclet, mais precisamente  $Pe > 1000$ , surgiu uma nítida interface entre os fluidos.

Ainda em 1996, Chen e Meiburg [17], dando prosseguimento ao trabalho de Petitjeans e Maxworthy [58], estudaram numericamente o deslocamento de fluidos miscíveis em tubos e placas paralelas. As simulações foram realizadas considerando-se escoamentos em regime permanente, fluidos incompressíveis com inércia desprezível e um sistema de referência que se deslocava com a frente de propagação da dispersão. Os dois casos simulados, um escoamento com alto e outro com baixo número de Peclet, apresentaram boa concordância com os resultados experimentais anteriores.

Naquele mesmo ano, Bakhtiyarov e Siginer [4] investigaram o deslocamento líquido-líquido, sob regime laminar, em tubos cilíndricos horizontais. Eles observaram que o tempo de deslocamento (*breakthrough time*), ou seja, o tempo que o fluido deslocado leva para aparecer na saída do duto, aumentava com o decréscimo da razão de viscosidades, na taxa de cisalhamento zero.

Também em 1996, Kroken, Sjaholm e Olsen [45] propuseram um novo método de cimentação primária, chamado *tide flow*, posteriormente utilizado com sucesso em poços reais, baseado na diferença entre as densidades dos fluidos deslocador e deslocado. Os autores perceberam que essa diferença faz com que o fluido de perfuração vá do lado mais estreito do anular para a parte mais larga. Tal fenômeno pode ser minimizado se utilizarmos baixas vazões de bombeamento, provocando, assim, uma maior troca de fluidos.

No ano seguinte, Szabo e Hassager [66] simularam a substituição de fluidos newtonianos, imiscíveis e com a mesma viscosidade em anulares, através da aplicação do método de elementos finitos. O processo foi investigado à luz de diferentes razões de densidades, bem como de diferentes números de Reynolds. Os resultados mostraram que, para anulares concêntricos, um fluido deslocador com maior densidade promove um aplainamento da interface, reduzindo instabilidades e recirculações nessa região. Para o caso de anulares excêntricos, um fluido deslocador mais denso provoca o transporte azimutal de massa da parte mais larga para a região mais estreita.

Souza Mendes, Thompson e Naccache [71], em 1999, desenvolveram uma nova equação constitutiva para materiais incompressíveis e apresentaram seu desempenho em escoamentos através de uma geometria com contrações abruptas. A formulação matemática dessa relação supõe que o tensor das tensões é uma função isotrópica de duas grandezas cinemáticas, a saber: o tensor taxa de deformação  $\dot{\gamma}$  e o tensor taxa de rotação relativa  $\overline{W}$ , sendo este dado por  $\overline{W} = W - \Omega$ , onde  $\Omega$  é o tensor taxa de rotação dos autovetores de  $\dot{\gamma}$ . Assim, o modelo introduzido é capaz de ajustar independentemente dados de viscosidade em cisalhamento e em extensão e tanto o primeiro e o segundo coeficientes de tensões normais. Fechando a publicação, os autores compararam os resultados da equação proposta com dados encontrados na literatura, obtendo boa concordância qualitativa.

Ainda nesse ano, Mukhalalaty *et al.* [55] foram bem sucedidos na execução da cimentação primária em um único estágio, testando cimentos de baixa densidade, em cinco poços. Para tanto, eles usaram pastas com redução de água (RWS, Reduced Water Slurry) visando diminuir a pressão hidrostática.

No mesmo ano de 1999, Schleizer e Bonnezaze [62] se dedicaram a compreender o comportamento dinâmico e a estabilidade de uma gota bidimensional imiscível, submetida a escoamento em cisalhamento, induzido por pressão entre placas paralelas. Testemunhou-se

que o tamanho da gota e a deformação da interface aumentavam com o número de capilaridade e a razão de viscosidades.

Um ano mais tarde, Allouche, Frigaard e Sona [1] estudaram a possibilidade do surgimento de uma camada residual de massa depositada nas paredes de um canal plano, durante a substituição de um fluido viscoplástico por outro. O artigo evidenciou que é possível não só estimar a espessura máxima dessa camada, como também definir um valor crítico de espessura para o qual o fluido começa a recircular junto à frente de deslocamento. Além disso, notou-se que a camada residual é mais bem caracterizada em escoamentos lentos, já que, para deslocamentos rápidos, ocorre à desestabilização da interface comum.

Na área de pesquisas sobre os fluidos de perfuração, Biezen, van der Werff e Ravi [7] realizaram análises numéricas e experimentais, no ano de 2000. Modelos computacionais multifásicos em 3D foram implementados, possibilitando a definição de perfis de deslocamento e a sua caracterização em relação às condições de operação de um poço. Alinhado ao estudo analítico, foi testada experimentalmente a utilização de espaçadores químicos, observando sua eficiência na retirada da lama de perfuração. Os pesquisadores constataram que a adição de surfactantes na composição química dos espaçadores é de grande valia na remoção de resquícios de fluidos de perfuração a base de óleo na região mais baixa do revestimento e nas paredes do poço. Paralelamente, eles também destacaram que a vazão, a reologia e a densidade do “colchão” espaçador são de extrema importância na qualidade do procedimento.

Ainda naquele ano, McPherson [51] comparou diversas técnicas de cimentação, tanto de poços verticais, quanto de poços horizontais, incentivando a discussão e revisão de muitos desses procedimentos. O artigo ressalta que a utilização de múltiplos espaçadores melhora a limpeza do poço. Outro ponto mencionado é o fato de que pastas de cimento mais finas, com pouca perda de fluido, são mais fáceis de serem misturadas e bombeadas, aumentando a eficiência do processo e proporcionando excelente isolamento de zonas e suporte dos tubos.

No ano de 2001, Frigaard, Allouche e Gabard-Cuoq [32] investigaram numericamente e experimentalmente o deslocamento de fluidos viscoplásticos através de dutos longos. Segundo eles, se o fluido deslocador apresentar uma tensão limite de escoamento menor do que a do fluido deslocado, é possível que ocorra a formação de uma camada residual gelificada nas paredes do tubo. Esses resíduos podem ficar mais espessos, caso haja aumento da velocidade média do escoamento, ou finos, caso haja aumento da tensão limite de escoamento da substância deslocada. Além disso, ficou evidente que, quando a tensão de cisalhamento atuante na parede do tubo é maior do que a tensão limite de escoamento, a camada é removida.

Brand, Peixinho e Nouar [11], no mesmo ano, buscaram compreender melhor a dinâmica da remoção da lama de perfuração. Eles realizaram caracterizações reológicas dos líquidos envolvidos e definiram a transição laminar-turbulento, bem como a queda de pressão gerada. Isso foi possível através da medição da velocidade axial e das flutuações por meio de diferentes técnicas, tais como, ultra-som, anemometria e laser. A partir dos resultados obtidos, os pesquisadores sugeriram modelos matemáticos para descrever o comportamento dos fluidos, em função das suas características de operação, para os diferentes regimes de escoamento e, dessa maneira, puderam estimar a mínima vazão de bombeamento que otimiza a limpeza do poço.

Ainda em 2001, Yamamoto *et al.* [74] se debruçaram sobre o efeito da viscosidade de fluidos pseudoplásticos em relação aos padrões de formação e de crescimento de “*viscous fingers*” em células de Hele-Shaw, quando se injetava ar para deslocá-los. Foi constatado que a estrutura dos “*fingers*” na glicerina é densa, enquanto que a dos “*fingers*” nos fluidos não newtonianos é mais ramificada. Também se destacou que o número de ramificações aumentava com a pressão.

Bittleston, Ferguson e Frigaard [9], em 2002, analisaram numericamente a cimentação primária para várias configurações de poços. As simulações mostraram que a excentricidade do anular fazia com que um canal de lama fosse deixado para trás na região mais estreita. Finalmente, concluíram que, quando a excentricidade é muito grande ou a tensão limite de escoamento da lama é muito alto, ocorre uma estagnação completa da mesma na parte mais estreita do anular.

No mesmo ano, Théron, Bodin e Fleming [70] desenvolveram um novo método para a determinação da composição ótima dos “colchões” espaçadores, que viria a ser aplicado com sucesso em campo. Eles propuseram a divisão do processo em dois passos: primeiramente, a investigação das condições de serviço do poço, incluindo critérios de mobilidade, e, em seguida, a determinação propriamente dita do fluido espaçador para atender às necessidades verificadas. A partir daí, um simulador mostrava a performance do processo de remoção do fluido de perfuração com os espaçadores selecionados.

Ainda em 2002, Frigaard e Pelipenko [33] apresentaram uma nova modelagem 2D com resultados teóricos do escoamento de pastas de cimento em anulares excêntricos. Tal publicação discutia o fato de que, para certas combinações de propriedades físicas, excentricidade e inclinação, a interface poderia se tornar estável e atingir o regime permanente. Por fim, os autores ainda chegaram a uma expressão analítica capaz não só de descrever o formato da frente de deslocamento, como também indicar como essa forma é influenciada pelos parâmetros chave do processo.

Em 2003, Gabard e Hulin [34] mostraram um estudo numérico e experimental do deslocamento de fluidos não newtonianos, com tensões limite de escoamento iguais, por fluidos newtonianos, miscíveis e com a mesma densidade, ao longo de um tubo vertical. A principal conclusão obtida foi a de que a espessura da camada residual nas paredes do duto diminui à medida que a tensão limite de escoamento aumenta.

Souza Mendes e Dutra [23], em 2004, defenderam uma nova equação constitutiva para fluidos viscoplásticos. A função de viscosidade sugerida é contínua e prevê um patamar newtoniano para baixas taxas de cisalhamento, como constatado experimentalmente. Em seguida, observa-se uma queda do valor da viscosidade associada à tensão limite de escoamento. Finalmente, segue-se a região em que a diminuição da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento é descrita através de um polinômio *power-law*.

Nos dois anos seguintes, Soares, Carvalho e Souza Mendes [65] pesquisaram o deslocamento líquido-líquido e gás-líquido em um tubo capilar. Segundo eles, foi possível perceber uma fina camada do fluido deslocado depositada nas paredes da parte de trás do capilar. As previsões teóricas desse trabalho indicaram a influência de diferentes parâmetros de serviço na configuração da interface entre os fluidos e na espessura da camada residual deixada nas paredes.

No mesmo ano, Berry [6] conduziu um estudo em laboratório a fim de determinar a performance na remoção de fluidos de perfuração, tanto de base sintética quanto de base oleosa, através da injeção de “colchões” espaçadores à base de emulsões. Ele sugeriu que esses últimos líquidos têm uma capacidade maior de retirar a lama de perfuração do que aqueles à base de água ou surfactante.

Ainda em 2005, Dutra *et al.* [28] analisaram numericamente as operações de substituição de um fluido por outro dentro de um poço. O artigo tratou do deslocamento de fluidos não newtonianos por fluidos newtonianos e vice-versa, onde os efeitos de algumas variáveis, tais como a diferença de densidade e a reologia dos líquidos, foram observados. Pode-se perceber que as características reológicas exercem grande influência no processo como um todo, especialmente a razão de viscosidades, exigindo, portanto, que o comportamento viscoplástico dos líquidos seja bem conhecido. Sendo assim, os autores

indicaram que deveriam ser utilizados fluidos espaçadores mais viscosos nos procedimentos reais.

Na mesma época, Yamamoto *et al.* [75] estavam interessados na caracterização da velocidade da ponta de “*fingers*” pelo gradiente de pressão aplicada, utilizando a Lei de Darcy modificada, através da injeção de ar sobre fluidos não newtonianos em uma célula de Hele-Shaw. Foi relatado que a referida velocidade em geral crescia quando aumentava o gradiente de pressão, entretanto, podendo sofrer uma diminuição ou se manter constante, caso o número de ramificações se elevasse. Os autores concluíram, também, que a taxa de crescimento dependia da altura entre as placas paralelas e que, quando um desses “dedos” se ramificava, havia quebra da estabilidade e a velocidade entre os dois “*fingers*” resultantes decrescia, fazendo com que a interface dessa região ficasse estagnada.

Em 2007, Souza Mendes, Dutra, Siffert e Naccache [25] publicaram um artigo no qual discorriam sobre o deslocamento de líquidos viscoplásticos pela injeção de gás em tubos capilares. Eles observaram que o fluido viscoplástico era perfeitamente deslocado para vazões abaixo de um valor crítico. Uma possível explicação apontada é que, possivelmente, ocorre uma transição quando a tensão na parede se aproxima da tensão limite de escoamento do fluido viscoplástico em um deslocamento em regime laminar completamente desenvolvido em tubos.

Também naquele ano, Dimakopoulos e Tsamopoulos [27] desenvolveram um trabalho que versava a respeito do deslocamento de fluidos newtonianos e viscoplásticos em tubulações cilíndricas com expansões e contrações, através da injeção de ar. Eles atestaram o surgimento de regiões não deslocadas de fluido viscoplástico pelo filme depositado na parede do tubo. A explicação imaginada é que a viscoplasticidade tende a retardar a penetração do gás e aplanar a frente da bolha, reduzindo a espessura da camada de fluido depositada.

Nesse mesmo ano, Moyers-González *et al.* [54] simularam a operação de cimentação primária utilizando um modelo de Hele-Shaw, com fluidos não newtonianos regidos pela equação de Herschel-Bulkley. Através de simulação numérica, buscou-se descobrir se a pulsação do escoamento em ondas progressivas poderia reduzir a formação de uma canaleta de lama.

Também em 2007, Vargas e Farias [73] estudaram a recuperação secundária em poços de petróleo, através de deslocamentos de fluidos não newtonianos por fluidos newtonianos em células de Hele-Shaw. Comparando os resultados obtidos, concluiu-se que a eficiência do procedimento aumenta com a razão de viscosidades.

Ainda no ano de 2007, Guillot, Despoches e Frigaard [38] analisaram a performance dos fluidos espaçadores no processo de cimentação primária. Eles afirmaram que escoamentos turbulentos levam, em geral, a uma boa eficiência global, enquanto que regimes laminares podem criar instabilidades na interface. Os pesquisadores demonstraram, também, que muitas substâncias utilizadas como “colchões” espaçadores não promovem um movimento do tipo pistão, formando canais pelo fluido de perfuração no lado mais largo do anular, devido às diferenças de viscosidade e densidade. Assim, os autores sugerem a seleção de fluidos mais viscosos para essa finalidade.

Em 2008, Carrasco-Teja *et al.* [15] investigaram o deslocamento horizontal entre dois fluidos não newtonianos em regime laminar através de um anular excêntrico. Utilizou-se um modelo numérico unidimensional, variando a reologia e a excentricidade. Foi observado o efeito esperado da diferença de densidade: promover a estratificação, com o fluido mais denso movendo-se à frente.

No mesmo ano de 2008, Celnik [16] apresentou uma dissertação de mestrado sobre a análise qualitativa da substituição de fluidos no espaço anular de um poço vertical, por meio da interface formada entre os mesmos. No trabalho, foi verificado que, para os casos estudados (fluido mais viscoso deslocando um menos viscoso e vice-versa), quanto menor a

vazão, mais plana e estável era a fronteira entre os fluidos. É interessante destacar que a visualização lançou mão de planos de *lasers* e provou que a utilização de micro-partículas que refletem a luz incidida é viável. Entretanto, a autora destaca ser essencial encontrar pares de fluidos com índices de refração muito próximos não só entre si, como também ao do material da tubulação.

Finalmente, em 2009, Savino [61] realizou um estudo pioneiro do processo de substituição de um fluido por outro em anulares de tubos com geometrias não retilíneas. Embora sua proposta tenha sido bastante similar à do nosso projeto, o autor optou por uma análise numérica do deslocamento de fluidos newtonianos por fluidos não newtonianos e vice-versa. Ele concluiu que, no primeiro caso, a eficiência diminui com o aumento da velocidade e da viscosidade do fluido deslocado, enquanto que, no segundo, ela aumenta com o aumento da velocidade e da viscosidade do fluido deslocador.

### 3- Formulação do Problema

#### 3.1- Revisão Teórica

Como engenheiros, devemos formalizar precisamente nossos objetos de estudo. No caso desta obra, tratamos de fluidos e, portanto, é importante apresentar a seguinte definição: um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), seja qual for a sua magnitude. Assim, os fluidos compreendem as fases líquida e gasosa (ou de vapor) dos estados físicos nos quais a matéria existe.

O campo da mecânica de fluidos que se dedica a descrever a deformação de um corpo sob a influência de tensões é chamado reologia [31]. Essa ciência estuda as propriedades físicas que influenciam a forma e o fluxo de material, analisando parâmetros de viscosidade, plasticidade e elasticidade, dentre outros. Dessa maneira, os fluidos podem ser classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação [31], como abaixo:

##### 3.1.1- Fluidos Newtonianos

Os fluidos newtonianos são aqueles nos quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. Alguns exemplos comumente encontrados desses fluidos são a água, o ar, a glicerina e a gasolina.

Nesse caso, a constante de proporcionalidade é chamada de viscosidade dinâmica ou absoluta, representada por  $\mu$ , sendo uma propriedade do fluido a uma dada condição de temperatura e pressão. No Sistema Internacional, a unidade de viscosidade absoluta é dada por  $[\mu] = N.s.m^{-2} = Pa.s$ . Já no Sistema Métrico, tal propriedade é expressa em  $[\mu] = g.cm^{-1}.s^{-1} = poise$ , enquanto que, para o Sistema Gravitacional Britânico, a unidade é  $[\mu] = lbf.s.ft^{-2} = slug.ft^{-1}.s^{-1}$ .

Os aparelhos utilizados para caracterizar a viscosidade absoluta desse tipo de fluido são os chamados viscosímetros, embora possamos utilizar, também, reômetros com geometrias de medição apropriadas, conforme veremos a seguir. Nos viscosímetros Cannon-Fenske, que estão entre os mais comuns, se realiza a medição do tempo em que um determinado volume de líquido leva para escoar através de um tubo capilar e, então, resolve-se a seguinte equação:

$$\mu = C.t.\rho \quad (1)$$

Onde  $C$  é a constante do viscosímetro e  $\rho$  é a massa específica do fluido estudado.

### 3.1.2- Fluidos Não Newtonianos

Os fluidos não newtonianos são aqueles que se comportam de tal maneira que a tensão aplicada não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Alguns exemplos familiares são a pasta de dente e a tinta de pintar paredes.

Nesse caso, a viscosidade aparente não será constante e poderá decrescer ou aumentar com a taxa de deformação ou variar com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento. Essa grandeza é definida, por analogia aos fluidos newtonianos, através da expressão:

$$\mu_a = - \frac{\tau_{yx}}{\frac{du_x}{dy}} \quad (2)$$

Onde  $u_x$  é a componente na direção  $x$  ortogonal a  $y$ .

Esse tipo de fluido é classificado na literatura em dois grandes grupos:

- Fluidos não newtonianos independentes do tempo, que se dividem entre aqueles que possuem ou não tensão limite de escoamento.
- Fluidos não newtonianos dependentes do tempo, que são separados em tixotrópicos (viscosidade diminui com o tempo, em cisalhamento constante) ou reopéticos (viscosidade aumenta com o tempo, em cisalhamento constante).

Na figura 6, vemos o diagrama da tensão aplicada em função da taxa de deformação para diversos tipos de fluidos não newtonianos, comparados com o fluido newtoniano e o fluido ideal (aquele que não possui viscosidade):

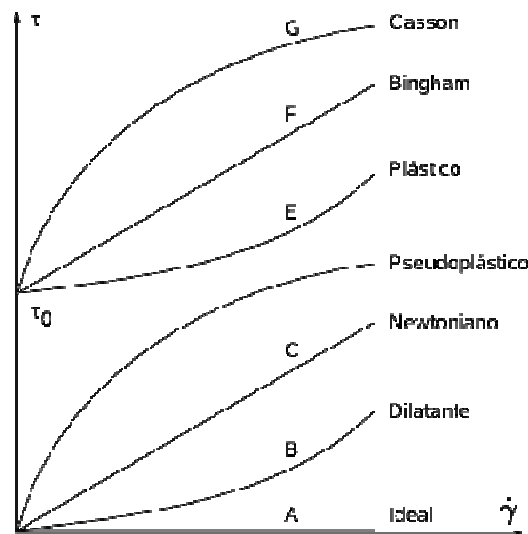


Figura 7 – Comportamento de Fluidos Não Newtonianos

Destacamos, aqui, os fluidos pseudoplásticos (“*shear thinning*”), onde a viscosidade aparente diminui com uma taxa de deformação crescente; os dilatantes (“*shear thickening*”), onde ocorre o comportamento inverso; e os plásticos de Bingham (viscoplásticos), que são altamente viscosos até atingirem uma tensão limite e, depois disso, apresentam uma relação linear entre sua viscosidade e a taxa de deformação.

A fim de mensurar a história de tensão e deformação de um fluido não newtoniano, é necessário utilizar um instrumento denominado reômetro. Esses aparelhos podem ser classificados através da cinemática do escoamento (cisalhamento ou extensão), da intensidade

e tipo de deformação (pequena, grande, regime permanente) e do tipo de escoamento (homogêneo ou não homogêneo). Os reômetros se dividem, ainda, em dois tipos: os rotacionais, onde o fluido é movimentado por uma superfície que gira, e os com gradiente de pressão, nos quais é através do referido gradiente que se gera o escoamento.

Nas últimas décadas, diversas equações foram propostas para modelar as relações observadas entre a viscosidade aparente  $\eta$  e a taxa de cisalhamento  $\dot{\gamma}$  para os mais variados fluidos não newtonianos. Poderíamos citar diversas dessas contribuições, mas isso fugiria ao escopo de nosso trabalho, já que, em nosso estudo, utilizamos apenas fluidos newtonianos.

### 3.2- Formulação Matemática

Nesta seção, apresentamos não apenas as equações clássicas de conservação da massa e da quantidade de movimento linear em notação tensorial, como também o modelo constitutivo apropriado aos líquidos utilizados em nossos testes experimentais. Ao final, realizamos, ainda, uma adimensionalização das principais relações envolvidas.

Em estudos analíticos de problemas de engenharia, é importante que, antes de tudo, sejam listadas as hipóteses adotadas em sua formulação matemática e conseqüente modelagem. Desse modo, destacamos que a aplicação das equações supramencionadas está condicionada, em nosso trabalho, às seguintes hipóteses:

1. Escoamento de fluidos incompressíveis.
2. Escoamento de fluidos newtonianos.
3. Escoamento laminar.
4. Escoamento isotérmico.
5. Simetria radial.

Além disso, devemos recordar que as equações utilizadas em mecânica dos fluidos são sempre referentes a partículas fluidas, definidas como uma pequena massa de fluido, de identidade fixa e volume infinitesimal  $dV$ . Portanto, torna-se necessário, também, estabelecer um sistema de referências espaciais adequado à geometria do problema. Por se tratar de um escoamento em uma seção anular, escolhemos, um sistema de coordenadas cilíndricas:

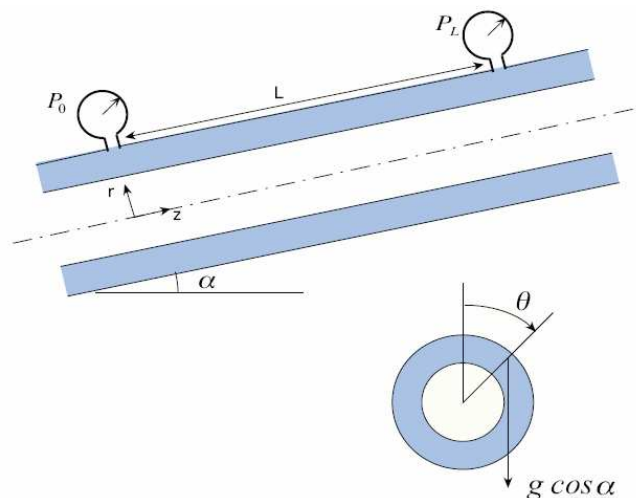


Figura 8 – Sistema de Coordenadas Cilíndricas da Geometria Anular [16]

#### 3.2.1- Equação da Conservação de Massa

A definição da conservação da massa nos diz que, para um dado volume de controle, a soma da taxa líquida de fluxo de massa que cruza a superfície de controle com a taxa de

variação com o tempo da massa dentro do volume de controle é nula. Assim, matematicamente temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (3)$$

Podemos, ainda, aplicar o Teorema de Leibnitz ao primeiro termo da equação (3) e o Teorema da Divergência de Gauss ao segundo termo da mesma equação, obtendo:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{VC} \text{div}(\rho \vec{V}) dV = 0 \quad (4)$$

Como desejamos que esta equação seja válida para qualquer ponto de nosso domínio, dividimos por  $dV$  e fazemos este volume tender a zero, encontrando:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

Pelos conhecimentos de cálculo elementar, sabemos que a equação pode ser reescrita através da definição de divergente, conforme abaixo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \rho = 0 \quad (6)$$

Tomando a hipótese de escoamento de fluidos incompressíveis, vemos que as massas específicas dos mesmos não variam com o tempo nem com a posição, ou seja, nem com  $t$ , nem com as coordenadas cilíndricas  $(r, \theta, z)$ . Dessa maneira,  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  e  $\vec{\nabla} \rho = 0$ , levando à seguinte simplificação:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (7)$$

No sistema de coordenadas cilíndricas, portanto, a equação de conservação da massa se torna:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Onde  $u_r$ ,  $u_\theta$  e  $u_z$  são os componentes do vetor velocidade nas direções  $r$ ,  $\theta$  e  $z$ , respectivamente.

### 3.2.2- Equação de Conservação da Quantidade de Movimento Linear

A conservação da quantidade de movimento linear, também conhecida como Segunda Lei de Newton, nos diz que o somatório das forças externas é igual ao produto da massa pela aceleração. Dessa forma, em linguagem matemática, temos:

$$\sum \vec{F}_{Ext} = m \vec{a} \Rightarrow \sum \vec{F}_{Ext} dV = \rho dV \frac{D\vec{V}}{Dt} \quad (9)$$

Devemos entender o somatório das forças externas como o somatório das forças de corpo  $\vec{f}_c$  com as forças de superfície  $\vec{f}_s$ . No caso, há apenas uma força de corpo, que é a força gravitacional, e duas forças de superfície, que são a força viscosa  $\vec{f}_\mu$  e a força de pressão  $\vec{f}_p$ , às quais nosso volume infinitesimal de fluido está submetido. Sendo assim, fazemos:

$$\rho dV \frac{D\vec{V}}{Dt} = \vec{f}_c + \vec{f}_p + \vec{f}_\mu \quad (10)$$

Reescrevendo a equação por unidade de volume e explicitando o cálculo das forças externas, obtemos:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \nabla \cdot \underline{\underline{T}} + \rho \vec{g} \quad (11)$$

Onde  $\frac{D\vec{V}}{Dt}$  é a aceleração total ou material e  $\underline{\underline{T}}$  é o tensor das tensões.

Esse tensor das tensões pode ser calculado conforme a seguir:

$$\underline{\underline{T}} = -p \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{\tau}} \quad (12)$$

Onde  $\underline{\underline{I}}$  é a matriz identidade,  $p$  é a pressão e  $\underline{\underline{\tau}}$  é o tensor extra-tensão.

Substituindo a expressão acima na equação (11), chegamos a:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \nabla \cdot (-p \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{\tau}}) + \rho \vec{g} \quad (13)$$

No sistema de coordenadas cilíndricas, a equação de conservação da quantidade de movimento linear se torna, então:

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} - \left| \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{\theta r})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\tau_{zr})}{\partial z} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right| + \rho g_r \quad (14)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_\theta u_r}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} - \left| \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{\theta\theta})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\tau_{z\theta})}{\partial z} - \frac{\tau_{\theta r} - \tau_{r\theta}}{r} \right| + \rho g_\theta \quad (15)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left| \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{\theta z})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} \right| + \rho g_z \quad (16)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $u_r$ ,  $u_\theta$  e  $u_z$  são os componentes do vetor velocidade,  $g_r$ ,  $g_\theta$  e  $g_z$  são os componentes do vetor gravidade e  $\frac{\partial p}{\partial r}$ ,  $\frac{\partial p}{\partial \theta}$  e  $\frac{\partial p}{\partial z}$  são os componentes do gradiente de pressão, nas direções  $r$ ,  $\theta$  e  $z$ , respectivamente.

### 3.2.3- Equações Constitutivas

Para descrevermos o comportamento mecânico dos materiais, necessitamos relacionar a tensão aplicada com a cinemática. Tal relação é obtida através das equações constitutivas. Todos os fluidos, sendo eles newtonianos ou não, podem ser modelados pelas equações de Fluido Newtoniano Generalizado – FNG [8], mostradas a seguir:

$$\underline{\underline{\tau}} = \eta(\underline{\underline{\dot{\gamma}}})\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \quad (17)$$

Onde  $\eta$  é a função viscosidade,  $\underline{\underline{\dot{\gamma}}}$  é o tensor taxa de deformação e  $\dot{\gamma}$  é a intensidade da taxa de deformação.

A taxa de cisalhamento é obtida da seguinte maneira:

$$\underline{\underline{\dot{\gamma}}} = \nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T \quad (18)$$

$$\dot{\gamma} \equiv |\underline{\underline{\dot{\gamma}}}| = \sqrt{\frac{1}{2} \text{tr}(\underline{\underline{\dot{\gamma}}}^2)} \quad (19)$$

Dessa forma, podemos encontrar os componentes do tensor extra-tensão, necessários para solução das equações de conservação da quantidade de movimento linear. São eles:

$$\tau_{rr} = 2\eta(\dot{\gamma})\left(\frac{\partial u_r}{\partial r}\right) \quad (20)$$

$$\tau_{\theta\theta} = 2\eta(\dot{\gamma})\left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}\right) \quad (21)$$

$$\tau_{zz} = 2\eta(\dot{\gamma})\left(\frac{\partial u_z}{\partial z}\right) \quad (22)$$

$$\tau_{\theta r} = \tau_{r\theta} = \eta(\dot{\gamma})\left(r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\theta}{r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta}\right) \quad (23)$$

$$\tau_{zr} = \tau_{rz} = \eta(\dot{\gamma})\left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}\right) \quad (24)$$

$$\tau_{z\theta} = \tau_{\theta z} = \eta(\dot{\gamma})\left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z}\right) \quad (25)$$

Anteriormente vimos que, para os fluidos newtonianos, a relação entre tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é linear e diretamente proporcional, com parâmetro de proporcionalidade denominado viscosidade absoluta ou dinâmica  $\mu$ . Sendo assim, os fluidos newtonianos têm função viscosidade constante, ou seja:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \mu \quad (26)$$

Com essa relação, simplificamos os componentes do tensor extratensão, e substituímos suas fórmulas nas equações (14) a (16), obtendo as equações completas de conservação da quantidade de movimento linear.

### 3.2.4- Análise Dimensional

Quando se deseja reproduzir uma determinada operação de campo em uma planta experimental de tamanho reduzido e que represente da melhor maneira possível os fenômenos que aconteceriam na situação real, é extremamente importante a realização de uma análise dimensional precisa e criteriosa. Isso porque os parâmetros de interesse são obtidos, essencialmente, através da adimensionalização das principais variáveis presentes nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento linear, no formato vetorial.

Tais parâmetros são utilizados na correlação dos dados, permitindo relacionar as informações do escoamento real e daquele obtido em laboratório. A análise dimensional torna-se uma ferramenta de enorme valor, na medida em que, para uma dada geometria e condições impostas, representa uma redução do número de variáveis a serem consideradas.

Neste trabalho, as grandezas relevantes são os diâmetros interno  $D_i$  e externo  $D_e$  do anular, o comprimento de onda  $\lambda$  da geometria sinuosa, a amplitude  $a$  dessas ondas, as massas específicas do fluido deslocador  $\rho_1$  e deslocado  $\rho_2$ , as viscosidades dinâmicas desses fluidos, respectivamente  $\mu_1$  e  $\mu_2$ , a tensão superficial da interface entre ambos  $\sigma$  e a velocidade média do escoamento  $\bar{u}$ , além da aceleração gravitacional  $g$ . Para escoamentos incompressíveis, como o aqui considerado, a adimensionalização da equação de conservação da massa é trivial e não gera nenhum grupo adimensional. Por outro lado, na equação de conservação da quantidade de movimento linear, encontramos os seguintes parâmetros:

$$\text{A razão de aspecto} = \frac{D_h}{D_i} \quad (27)$$

$$\text{A razão de comprimento} = \frac{\lambda}{D_h} \quad (28)$$

$$\text{A razão de amplitude} = \frac{A}{D_h} \quad (29)$$

$$\text{A razão de densidades} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (30)$$

$$\text{A razão de viscosidades} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (31)$$

$$\text{O número de Capilaridade} = Ca = \frac{\mu_2 \cdot \bar{u}}{\sigma} \quad (32)$$

$$\text{O número de Reynolds} = Re = \frac{\rho_2 \cdot D_h \cdot \bar{u}}{\mu_2} \quad (33)$$

$$\text{O número de Froude} = Fr = \frac{\rho_2 \cdot \bar{u}^2}{|\Delta\rho| \cdot g \cdot D_h} \quad (34)$$

Onde  $D_h = D_e - D_i$  é o diâmetro hidráulico para espaços anulares, dado pela diferença entre os diâmetros externo e interno do anular.

## 4- Métodos Experimentais

### 4.1- Planta Experimental

Nossa planta experimental foi projetada e construída para representar um poço de petróleo horizontal não retilíneo, de forma que pudéssemos simular um processo de

substituição de líquidos em sua região anular. O aparato de testes deveria, também, permitir a visualização da forma da interface entre cada par de fluidos e o aspecto final da operação, possibilitando uma análise qualitativa de sua eficiência. Na figura 8, observamos o panorama geral de nossa bancada de trabalho:

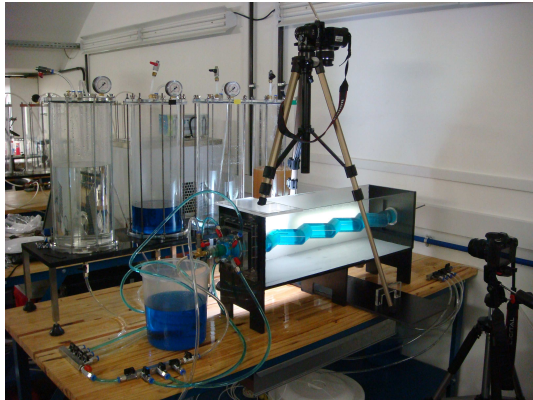


Figura 9 – Panorama Geral da Planta Experimental

#### 4.1.1- Arranjo de Tubos

Baseados no conhecimento prático adquirido pelo Grupo de Reologia do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, sabemos que montagens experimentais de grandes dimensões geram enormes dificuldades que, na grande maioria dos casos, não encontram uma justificativa razoável na melhoria dos resultados. Esses problemas se relacionam tanto a aspectos físicos, como a área ocupada por cada projeto, quanto a aspectos operacionais, como os enormes volumes de fluidos e os grandes esforços de manutenção e limpeza necessários.

Sendo assim, procuramos, através da análise dimensional citada no capítulo anterior, reduzir as dimensões de nossa bancada experimental para uma escala que facilitasse a realização dos testes, sem comprometer os objetivos almejados. Com tal propósito, levamos em conta, além das dimensões e grandezas características dos poços de petróleo reais, a disponibilidade comercial e o custo dos materiais e processos de fabricação possíveis.

Idealizamos, então, um arranjo horizontal de tubos concêntricos dispostos em forma de uma série de ondas triangulares, de maneira a modelar a sinuosidade intrínseca dos poços de petróleo horizontais. Embora, em todos os casos por nós analisados, a ondulação estivesse no plano horizontal, a configuração pode ser rotacionada para que ela fique no plano vertical, multiplicando as possibilidades de estudo. Abaixo, vemos uma concepção artística do referido arranjo, com a ondulação na vertical, já dentro da caixa de visualização, sobre a qual discutiremos em seguida:

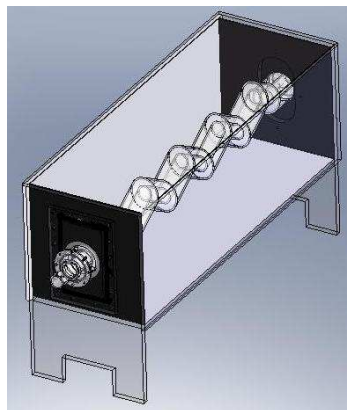


Figura 10 – Concepção Artística do Arranjo de Tubos

Na definição das dimensões do aparato de testes, recorreremos a dados da indústria do petróleo [29]. As informações coletadas nos indicaram que o diâmetro externo da coluna de revestimento dos poços hoje em operação usualmente se encontra entre 5" e 7", quando o diâmetro da perfuração na formação rochosa varia entre 8½" e 19", respectivamente. Assim, atualmente, a razão de aspecto da região anular dos poços de petróleo é:

$$0,70 \leq \frac{D_h}{D_i} = \frac{D_e - D_i}{D_i} \leq 1,71 \quad (35)$$

Onde  $D_e$  é o diâmetro externo da região anular, dado pelo diâmetro da perfuração na formação rochosa, e  $D_i$  é o seu diâmetro interno, dado pelo diâmetro externo da coluna de revestimento.

Reconhecendo que a razão de aspecto em nosso arranjo de tubos deveria estar dentro dessa mesma faixa, estipulamos como valor alvo  $D_h/D_i \cong 1,00$ . Além disso, como forma de tornar a montagem menos frágil e mais leve, permitindo, também, a visualização do escoamento, optamos por utilizar tubulações de acrílico translúcido.

Após uma pesquisa de mercado, concluímos que os tubos comerciais que melhor se enquadravam na razão proposta e ainda mantinham o conjunto razoavelmente compacto eram aqueles com 30,0mm e 60,0mm de diâmetro externo, ambos com 3,0mm de espessura. Sendo assim, o espaço anular em nosso aparato experimental é limitado pelos diâmetros  $D_i = 30,0mm$  e  $D_e = 54,0mm$ , gerando uma razão de aspecto  $D_h/D_i = 0,80$ .

Já em referência à sinuosidade desejada, buscamos projetar uma geometria com ondas de comprimento  $2,5D_e \leq \lambda \leq 3,0D_e$  e amplitude  $0,5D_e \leq a \leq 1,0D_e$ , a fim de evidenciar os efeitos do perfil irregular sobre o deslocamento dos fluidos. A partir dessa relação entre comprimento e amplitude, chegamos ao desenho de ondas triangulares com arestas de 92,0mm inclinadas 30° em relação ao eixo longitudinal da bancada experimental, fornecendo  $\lambda \cong 2,95D_e \cong 159,3mm$  e  $a \cong 0,86D_e \cong 46,0mm$ . Definimos, então, que a formação total deveria conter 4 ondas completas, delimitadas por 1/4 de onda em cada extremidade, o que nos garantia uma seção de testes relevante e compatível com o espaço disponível.

Seguindo as diretrizes aqui expostas, a empresa **Incomplast** construiu um arranjo com comprimento total de aproximadamente 1030,0mm, onde apenas 750,0mm correspondem ao comprimento da sinuosidade, sendo o restante dedicado às seções horizontais de entrada e saída de fluidos, assim como à área de passagem de fluido do tubo interno para o anular. Na figura 10, observamos uma vista em corte do conjunto:

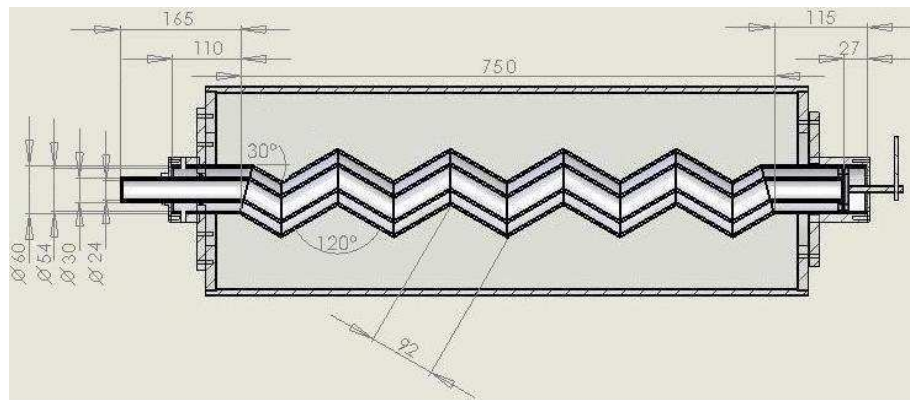


Figura 11 – Vista em Corte do Arranjo de Tubos

Cabe ressaltar que, como desejávamos reproduzir com satisfatória fidelidade a operação de cimentação primária de poços de petróleo, o deslocamento de um fluido pelo outro deveria se iniciar apenas a partir do começo da região anular do lado oposto ao da entrada do fluido deslocador. Esse cuidado, além de simular a existência do tampão de fundo no procedimento de campo, também tinha a finalidade de manter a interface inicial no anular a mais plana possível, evitando recirculações indesejáveis.

Projetamos, então, um sistema semelhante ao utilizado em experimentos congêneres realizados pelo Grupo de Reologia. Nosso tampão consiste, portanto, em um disco de acrílico que pode ter sua posição alterada dentro do tubo externo através de uma barra roscada, abrindo ou fechando a passagem de fluidos do tubo interno para o anular. A seguir, pode-se ver a referida peça, assim como o sistema na posição fechada (a) e aberta (b):

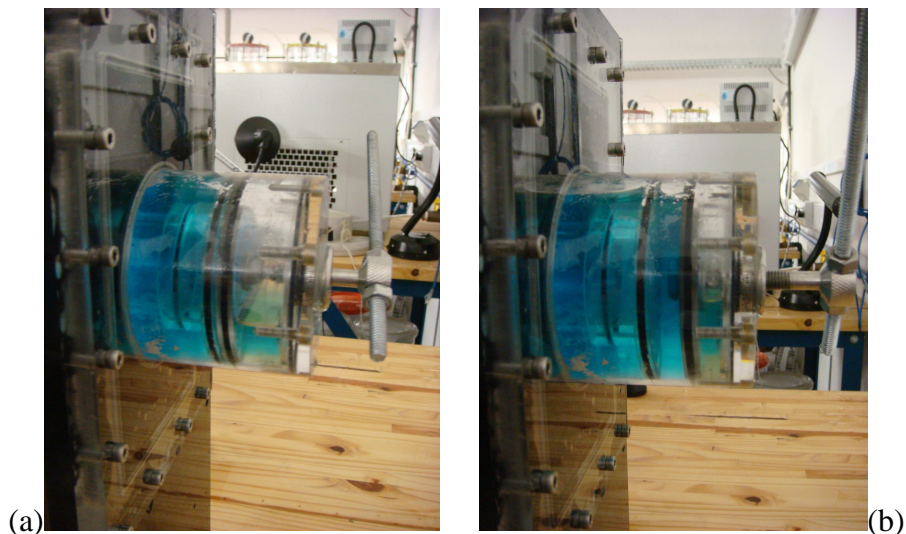
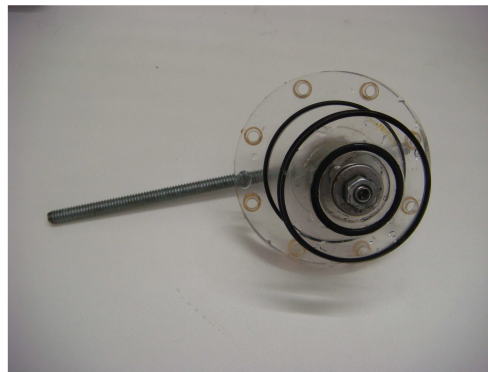


Figura 12 – Sistema Tampão

#### 4.1.2- Sistema de Circulação de Fluidos

Toda a bancada experimental foi construída de forma a permitir a utilização de mais de dois fluidos por teste, já imaginando a possibilidade de se realizarem experimentos futuros mais avançados. Assim, foram fabricados quatro reservatórios de acrílico com capacidade aproximada de 14 litros cada um. Esses reservatórios possuem 500,0mm de altura, 200,0mm de diâmetro externo e 5,0mm de espessura da parede, com tampa removível e fundo de 20,0mm de espessura. Destacamos que, embora o acrílico não seja o material mais adequado para vasos de pressão, avaliou-se que tais dimensões conferiam uma boa resistência às pressões de trabalho.



Figura 13 – Reservatórios

A circulação dos líquidos é feita, portanto, pela pressurização do recipiente onde se encontra o fluido desejado, com ar comprimido proveniente das instalações do Laboratório de Hidráulica de Poço do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, no qual montamos nossa planta experimental. Dessa maneira, cada vaso é equipado com um manômetro classe B-ABNT do fabricante **Famabras**, com escala de 0 a 4kgf/cm<sup>2</sup> (0 a 60psi), e possui uma entrada para ar comprimido e uma saída para o líquido armazenado. Em cada reservatório, há, também, um engate rápido adicional em que podemos acoplar uma mangueira para entrada de água, advinda da tubulação própria do laboratório, de forma a facilitar o procedimento de limpeza do conjunto.

A distribuição de fluidos é realizada por meio de comandos de válvulas, ocorrendo em mangueiras de plástico do fabricante **Mantova**, com 10,0mm de diâmetro externo e 1,5mm de espessura, capazes de suportar até 10bar . Na figura 13, encontramos um esquema do sistema de circulação de fluidos de nosso experimento:

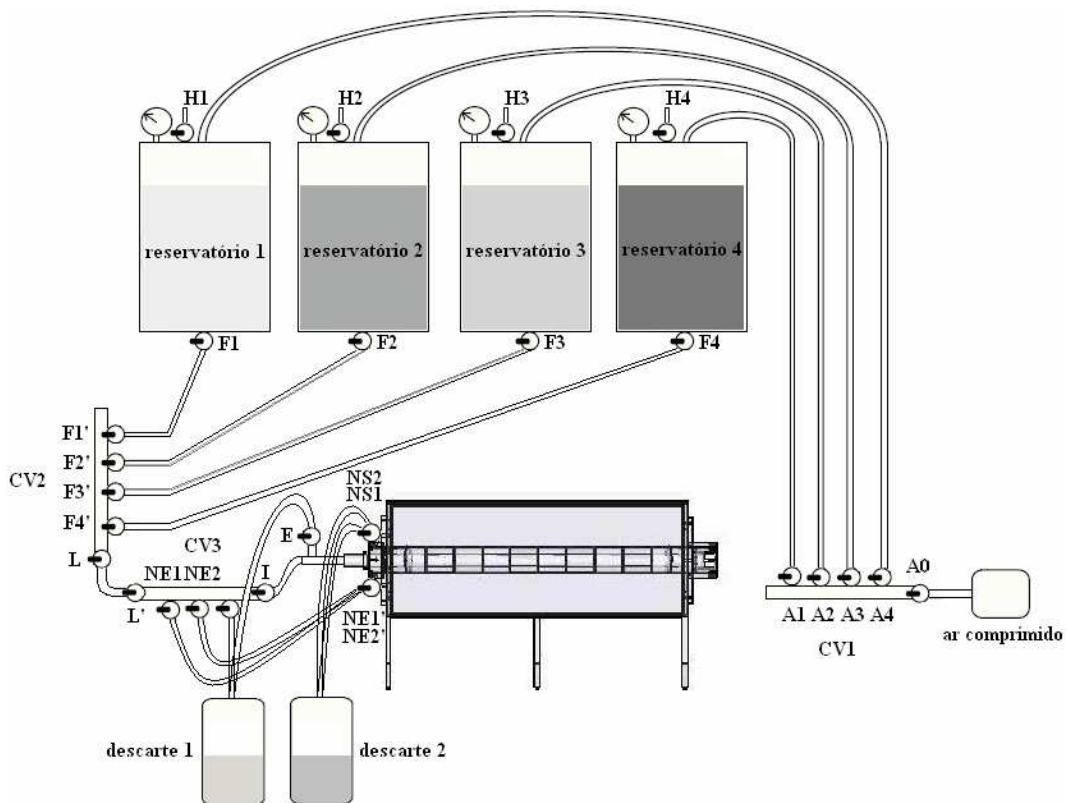


Figura 14 – Sistema de Circulação de Fluidos

O comando de válvulas CV1 é responsável por direcionar o ar comprimido, admitido pelo registro A0, para cada um dos reservatórios, através das válvulas A1, A2, A3 e A4. Por outro lado, as válvulas H1, H2, H3 e H4 impedem a entrada de impurezas, quando a mangueira de água para limpeza não está conectada aos engates rápidos já mencionados.

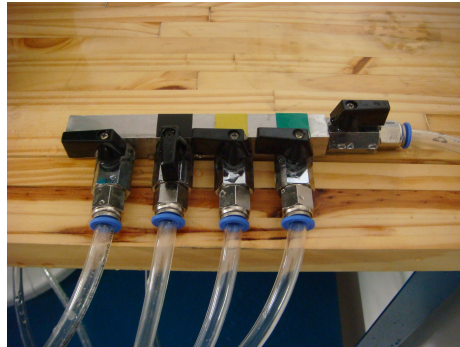


Figura 15 – Comando de Válvulas CV1

Já o comando CV2 controla a saída de fluidos de cada um dos recipientes, através das válvulas F1', F2', F3' e F4', encaminhando-os para o próximo comando de válvulas, pelo registro L. No fundo dos vasos de pressão há, ainda, as válvulas F1, F2, F3 e F4, utilizadas para impedir o vazamento dos líquidos, caso as mangueiras tenham que ser desconectadas.

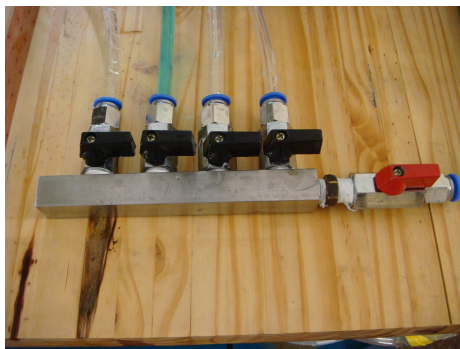


Figura 16 – Comando de Válvulas CV2

O último controle, denominado CV3, por sua vez, distribui o líquido, inserido pelo registro L', para o espaço anular da seção de testes, através das válvulas NE1 e NE2, ou para o tubo interno, através da válvula I, conforme o caso. Existe ali, ainda, um quarto registro, a válvula D, responsável pela drenagem do fluido acumulado nos comandos CV2 e CV3.

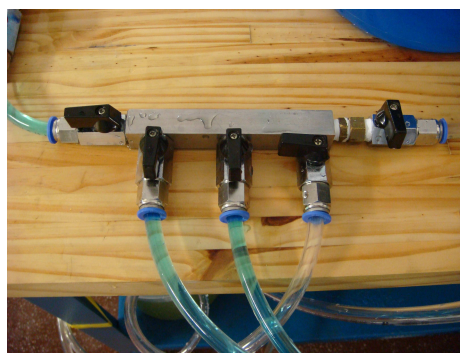


Figura 17 – Comando de Válvulas CV3

Assim, o líquido a ser deslocado entra no anular pelas válvulas NE1' e NE2', localizadas na parte inferior de sua parede externa, e o líquido deslocador entra no tubo interno pela válvula I', localizada na parte frontal desse. Os detalhes dessa parte do sistema podem ser verificados na fotografia abaixo:

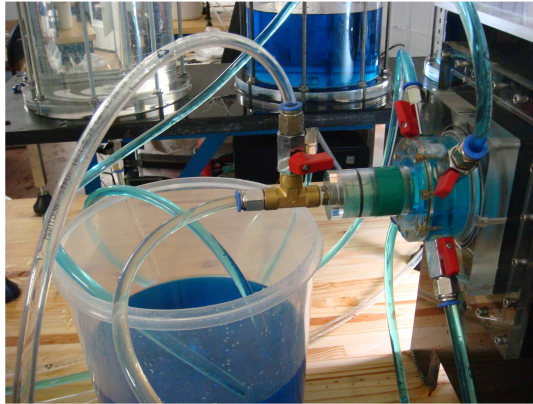


Figura 18 – Válvulas de Entrada e Saída de Fluidos do Arranjo de Tubos

Como podemos perceber, nessa mesma seção, encontra-se a válvula E de escape de ar, imprescindível na completação do tubo interno. As válvulas NS1 e NS2, localizadas na parte superior do anular, possuem a mesma função durante o preenchimento dessa outra região e são, também, por onde ocorre a saída dos fluidos durante os testes de deslocamento.

#### 4.1.3- Sistema de Visualização

Como sabemos da física óptica, a visualização da interface entre dois fluidos no interior de tubos cilíndricos é afetada pelo efeito de lente, devido à curvatura da geometria. Para reduzir esse efeito, construímos uma caixa de visualização, doravante denominada aquário, envolvendo a região de interesse do aparato experimental.

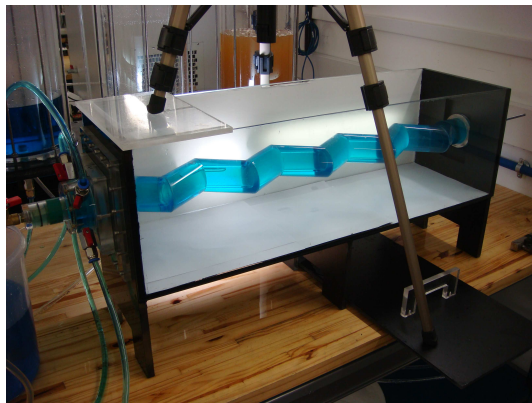


Figura 19 – Caixa de Visualização

O aquário, que pode ser visto na figura acima, possui paredes com  $15,0\text{mm}$  de espessura e um volume interno com  $800,0\text{mm}$  de comprimento,  $245,0\text{mm}$  de largura e  $245,0\text{mm}$  de altura. A parede frontal da caixa, por onde faremos a visualização lateral do processo de substituição de fluidos, e a parede oposta são de vidro, sendo todas as outras de acrílico.

Além disso, as paredes laterais são recobertas com um filme preto, enquanto que a parede posterior e inferior são revestidas com filme leitoso, de forma a permitir uma

iluminação difusa do arranjo de tubos por trás e um pano de fundo para as fotos que destacasse o escoamento. A tampa do aquário é removível através de alças e funciona, durante o experimento, como suporte para o tripé da câmera que faz a visualização superior do processo.

Tal caixa, para cumprir plenamente sua função, deveria ser preenchida por um fluido com índice de refração semelhante ao do acrílico utilizado na parede do tubo, como glicerina, por exemplo, e, portanto, possuía uma válvula de descarte em sua superfície inferior. Todavia, uma vez realizadas algumas simulações, chegamos à conclusão de que as distorções nas imagens não eram significativas e que o preenchimento do aquário tornaria o conjunto pesado e de mais difícil manutenção.

Assim, essa estrutura passou a ser utilizada mais como suporte e proteção da seção de testes, do que propriamente uma caixa de visualização. Contudo, veremos adiante que o aquário, em sua função primordial, será muito útil nos desdobramentos propostos dessa experiência.

Com relação à observação da interface de deslocamento em si, seria ideal utilizarmos um plano de visualização que passasse pelo eixo de simetria da região anular, a fim de permitir uma melhor caracterização da fronteira entre os dois fluidos. Uma técnica interessante seria misturar partículas traçadoras ao fluido deslocador, iluminando a área de interesse com um plano de laser, conforme fez Celnik [16] em seus estudos.

Entretanto, nossa geometria é substancialmente mais complexa que aquela utilizada no trabalho mencionado e geraria enormes dificuldades relacionadas, especialmente, a reflexos, o que achamos por bem evitar em um primeiro momento. Dessa maneira, optamos por obter as imagens das experiências através de fotografias sequenciais simples, tiradas de duas direções perpendiculares entre si.

Utilizamos, para tanto, duas câmeras fotográficas digitais da marca **Canon**, modelo EOS 40D. A primeira, para visualização lateral do escoamento, era posicionada, com auxílio de um tripé, na altura do eixo dos tubos e a cerca de 60,0cm da face frontal do aquário, mantendo o enquadramento paralelo a essa e centralizado a aproximadamente 21,5cm do início da sinuosidade, a partir do tampão. Já a segunda, para visualização superior do escoamento, era posicionada, também em um tripé, sobre a caixa de visualização, a cerca de 60,0cm do fim dessa, mantendo o enquadramento paralelo ao plano horizontal e centralizado a aproximadamente 41,5cm do início da sinuosidade, a partir do tampão. A figura a seguir ilustra as regiões fotografadas por cada câmera:

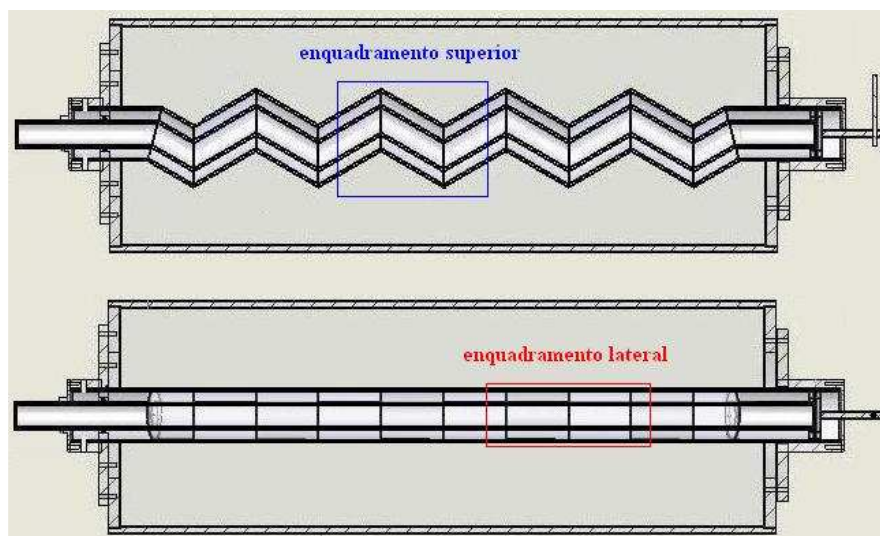


Figura 20 – Enquadramentos Superior e Lateral

As configurações das câmeras e as lentes utilizadas foram escolhidas a partir de testes preliminares de deslocamento, de maneira a proporcionar um bom equilíbrio entre a qualidade das imagens e a quantidade possível de fotografias em seqüência. Desse modo, selecionamos, nas duas câmeras, qualidade de gravação média/fina, sensibilidade ISO1000, modo de foco automático (AF-One Shot) e balanço de brancos automático (AWB). Na câmera superior, ajustamos a abertura e a velocidade do obturador para  $f/5,0$  e  $1/40s$ , respectivamente, enquanto que, na câmera lateral, escolhemos os valores  $f/2,5$  e  $1/400s$  para os mesmos parâmetros. Nessa configuração, as máquinas eram capazes de tirar fotos com velocidade de  $3fps$ , totalizando uma seqüência máxima de 454 quadros. A lente superior era do modelo **Canon** Zoom Lens EF-S 18-55mm 1:3.5-5.6 II e a lente lateral era do modelo **Canon** Compact-Macro Lens EF 50mm 1:2.5, ambas em modo manual.

Com relação à iluminação, ela foi realizada por duas luminárias de mesa, localizadas por detrás da parede posterior do aquário, mantendo todas as luzes do laboratório desligadas durante os experimentos. A primeira luminária, com uma lâmpada fluorescente longa de 15W, do fabricante **Osram**, foi centralizada com o enquadramento das imagens laterais e colocada na altura do arranjo de tubos, enquanto que a segunda, com uma lâmpada fluorescente compacta de 27W, da marca **Lightex**, foi colocada ao lado da seção fotografada pela câmera superior. A presença do filme leitoso sobre a referida parede garantiu uma iluminação difusa, contribuindo para a redução de sombras e reflexos inconvenientes.

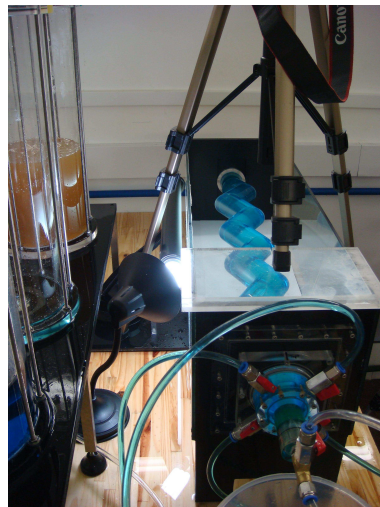


Figura 21 – Sistema de Iluminação

## 4.2- Procedimento Experimental

### 4.2.1- Seleção e Preparação de Fluidos

Por ser um experimento pioneiro sobre cimentação primária de poços de petróleo, no que se refere à sinuosidade do perfil longitudinal do espaço anular, buscamos selecionar, para os nossos testes, líquidos com comportamento newtoniano. Uma vez que, conforme citado anteriormente, a maioria das substâncias envolvidas no processo de cimentação possui natureza não newtoniana, torna-se claro que essa aproximação pode gerar erros grosseiros em relação ao caso real. Entretanto, pretendíamos, através deste projeto, ganhar experiência com o novo tipo de geometria e estabelecer uma base de comparação para futuras simulações envolvendo fluidos mais complexos.

A escolha de líquidos newtonianos serviu, paralelamente, ao propósito de concentrarmos nossas análises em apenas um parâmetro de interesse, a saber, a razão de viscosidades entre o deslocador e o deslocado. Isso porque se evitou, desse modo, a influência de efeitos viscoplásticos ou pseudoplásticos sobre os resultados apresentados.

Ainda assim, é extremamente difícil encontrar pares de fluidos que possuam as características necessárias para a realização dos experimentos propostos. Além de serem imiscíveis, eles devem ter índices de refração ou cores suficientemente diferentes para que a fronteira entre ambos seja facilmente percebida e fotografada com nitidez. Por outro lado, é desejável que os dois líquidos apresentem massas específicas semelhantes, minimizando o efeito de empuxo, que poderia alterar a forma da interface de deslocamento.

A fim de atender esse último pré-requisito, devem ser utilizadas, ao longo do estudo, duas soluções de substâncias diferentes em diversas concentrações, pois, ao se fixar um certo par de fluidos, a razão de viscosidades e a razão de densidades ficam imediatamente estabelecidas. Sendo assim, é interessante ressaltar que não basta que uma das soluções tenha sua concentração modificada para se obter várias razões de viscosidades, já que isso também alteraria a razão de densidades, que precisa ser mantida constante  $\rho_1/\rho_2 = 1$  em todos os casos.

Após analisarmos algumas alternativas, optamos por trabalhar com soluções aquosas de glicerina e mel de florada de laranjeira. A escolha desses solutos foi baseada na disponibilidade comercial dos mesmos e na possibilidade de se varrer um grande espectro de razões de viscosidades, igualando-se as massas específicas das respectivas soluções em inúmeros valores. Já a preferência pela base aquosa, ao invés da base orgânica, deve-se ao fato de a segunda, ao mesmo tempo em que dificulta a visualização da interface, ser mais difícil de preparar e manipular, contribuindo para uma deteriorização mais rápida da planta experimental, por problemas de limpeza.

Além disso, soluções de mel e glicerina são imiscíveis, não ocorrendo difusão significativa entre ambas no espaço de tempo de alguns minutos, similar aos das experiências, o que foi comprovado através de um simples teste visual preliminar. Outro ponto favorável notado é que, apesar das soluções apresentarem índices de refração muito próximos, o que em tese prejudica a percepção da interface de contato, esses índices são parecidos ao do acrílico dos tubos e do vidro do aquário, como veremos adiante, reduzindo os efeitos de lente da geometria.

A questão dos índices de refração semelhantes ainda é menos relevante porque o mel possui uma coloração amarela natural, o que o distingue bastante bem da incolor glicerina. Paralelamente, como o mel era dissolvido em água, achamos interessante adicionar um corante azul à glicerina, de forma a garantir que, mesmo em soluções bastante diluídas, fosse possível observar a interface entre ambas.

Um cuidado que tomamos para assegurar uma boa reprodutibilidade dos resultados gerados, foi compra de um lote de mel grande o suficiente para preparar todas as soluções necessárias ao nosso projeto. Tal precaução é muito importante, pois, sendo uma substância natural, mel produzido por diferentes apiários ou em diferentes épocas de florada podem apresentar grandes variações em suas características físico-químicas.

Outro inconveniente de se trabalhar com uma substância orgânica é a sua acentuada perecibilidade, ocasionada pela alta concentração de nutrientes, o que favorece a proliferação de microorganismos. De maneira a impedir a deteriorização das soluções de mel, caso fosse necessário armazená-las durante alguns dias, lançamos mão de um biocida comumente utilizado pela indústria alimentícia, o sorbato de potássio.

Uma vez especificados os solutos com os quais faríamos nossos fluidos, partimos, então, para a definição das razões de viscosidades que analisaríamos em nossos estudos.

Para tanto, caracterizamos soluções aquosas de mel e glicerina com 20%, 40%, 60%, 80% e 100% em massa, com relação à viscosidade dinâmica e à massa específica, a fim de estabelecermos os pares de fluidos com mesma densidade e suas respectivas razões de viscosidades.

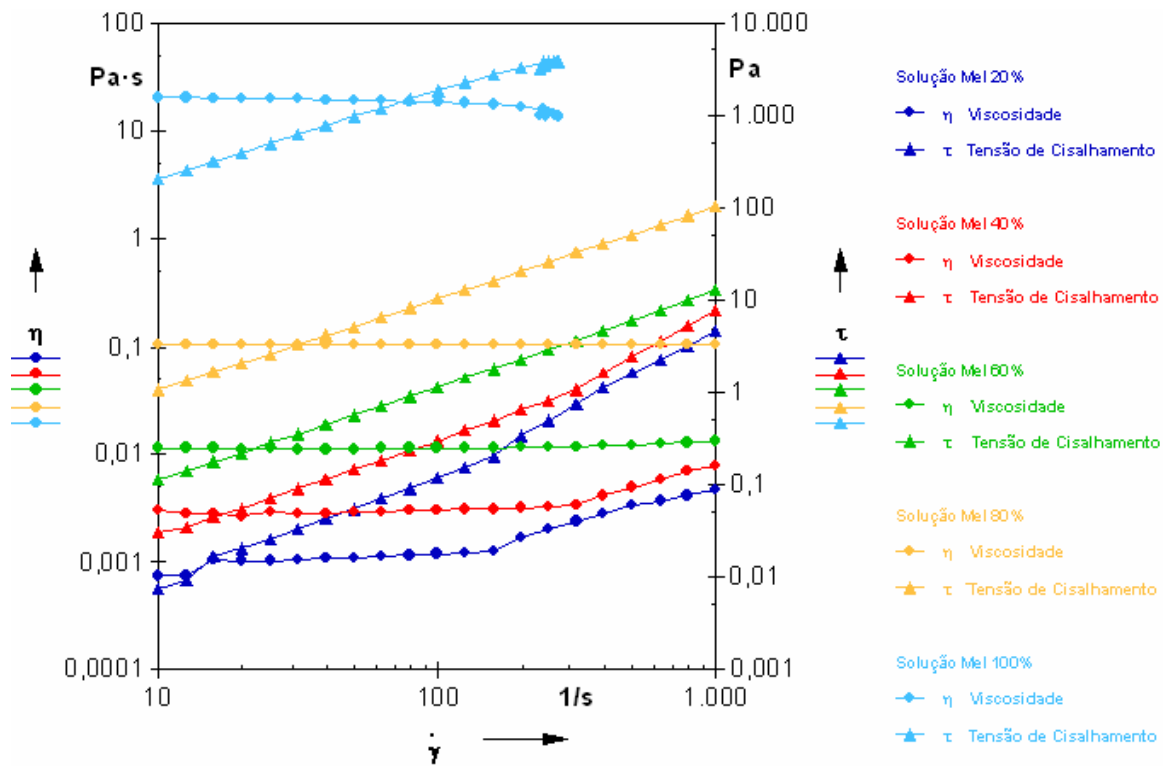
A preparação dessas soluções seguiu um rigoroso procedimento, com o intuito de minimizar os erros de medição. Para obter soluções de 100 gramas com  $x\%$  em massa de mel, nivelávamos uma balança eletrônica da marca **Bioprecisa**, modelo FA2104N, e tarávamos um becher de vidro de 100ml do fabricante **Rom Alzi**. Em seguida, medíamos  $100 - x$  gramas de água deionizada, retirada de um deionizador **Permutation**. Tarávamos novamente a balança com outro recipiente idêntico, no qual colocávamos  $x$  gramas de mel de florada de laranjeira centrifugado 100% puro, do fornecedor **Seiva das Flores**. A água deionizada era, então, misturada ao mel com um bastão de vidro de forma a produzir uma solução homogênea, sendo o recipiente coberto com filme para minimizar a contaminação e as perdas por evaporação. Procedimento similar era realizado para as soluções da outra substância, substituindo o mel pela glicerina ( $C_3H_5(OH)_2$ ), código 123, do fabricante **Vetec**.

A mensuração das viscosidades absolutas foi feita com um reômetro rotacional da marca **Anton Paar**, modelo Physica MCR301, pertencente ao Laboratório de Reologia do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Esse aparelho é conectado não só a um banho térmico do fabricante **Julabo**, modelo F25, que fornece água à  $20,0^\circ C$ , como também à rede de ar comprimido do laboratório em questão. Foi utilizada uma geometria de medição “*double couette*”, também da **Anton Paar**, modelo C-DG26,7/T200/SS E, com vistas a aumentar a superfície de contato com o fluido, tornando o processo mais eficiente. Já os parâmetros selecionados para a obtenção da “*flow curve*” foram: temperatura  $25,0^\circ C$ , perfil da curva “*ramp log*” com 10 pontos por década e taxa de cisalhamento variando entre  $10s^{-1}$  e  $1000s^{-1}$ , com tempo fixo de medição de pontos (ponto de medição =  $20s$  e intervalo =  $420s$ ).

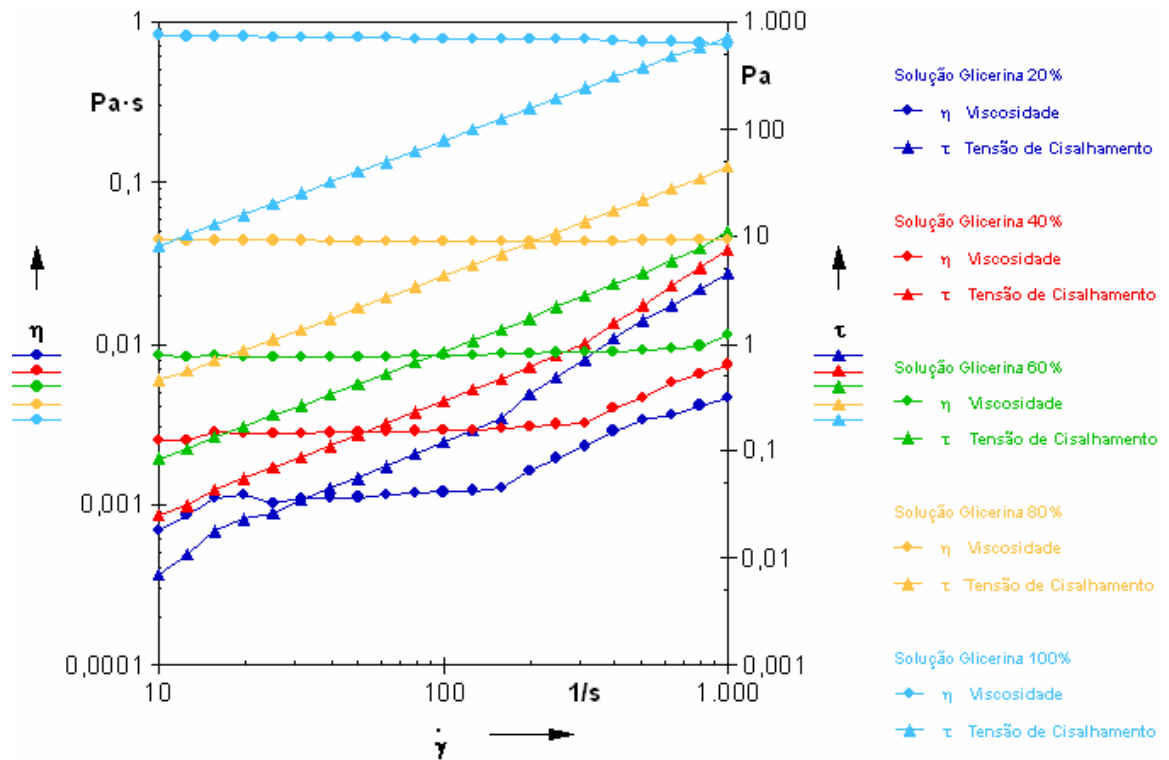
Na caracterização da massa específica, fez-se uso de um picnômetro de  $10ml$  **Laborglas**, modelo Boro 3.3., do Laboratório de Caracterização de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Com o uso da já mencionada balança eletrônica **Bioprecisa**, foram medidas as massas das soluções dentro desse recipiente a  $25,0^\circ C$ , o que permitiu à equipe do LFC fornecer-nos os valores finais da grandeza desejada.

Essa mesma equipe foi responsável pela aferição, a  $25,0^\circ C$ , da massa específica da água deionizada, através do mesmo picnômetro, e de sua viscosidade, através de um viscosímetro Ubbelohde **PSL**, posto dentro de um banho de viscosidade do fabricante **Tamson**, modelo TV4000. Tais valores definem as soluções 0% em massa de soluto.

Nas páginas seguintes, são apresentados os resultados de todas essas medições.



Taxa de Cisalhamento  
 Figura 22 – *Flow Curves* das Soluções de Mel



Taxa de Cisalhamento  
 Figura 23 – *Flow Curves* das Soluções de Glicerina

Massa de Mel (g)	Massa de Água (g)	Concentração (%)	Massa no Picnômetro (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
20,01	80,00	<b>20,01%</b>	12,6405	1066,0
40,02	60,05	<b>39,99%</b>	13,5763	1144,9
59,99	40,01	<b>59,99%</b>	14,5766	1229,1
80,07	20,03	<b>79,99%</b>	15,7224	1325,7
100,00	0,00	<b>100,00%</b>	16,9854	1432,1
Massa de Glicerina (g)	Massa de Água (g)	Concentração (%)	Massa no Picnômetro (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
20,03	80,02	<b>20,02%</b>	12,4053	1046,2
40,03	60,02	<b>40,01%</b>	13,0234	1098,3
60,05	40,02	<b>60,01%</b>	13,6609	1152,0
80,03	20,01	<b>80,00%</b>	14,2930	1205,2
100,00	0,00	<b>100,00%</b>	14,8851	1255,1

Tabela 1 – Massas Específicas das Soluções de Mel e de Glicerina

	Água Deionizada
<b>Viscosidade (Pa.s)</b>	0,0010
<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	986,6

Tabela 2 – Viscosidade e Massa Específica da Água Deionizada

É importante destacar, aqui, que as amostras para a medição da viscosidade e da massa específica foram as mesmas e, portanto, os valores reais das concentrações das soluções apresentadas nos gráficos da figura 21 são iguais àqueles observados na tabela 1. Assim, com base nos dados fornecidos pelo reômetro, podemos perceber que realmente tratam-se de fluidos newtonianos, apesar de notarmos pequenas variações nas viscosidades medidas em função da taxa de cisalhamento.

Esse fato, aparentemente incongruente, pode ser explicado considerando que tal variação não está relacionada a uma mudança real da viscosidade do fluido, mas sim a problemas de medição, ocasionados, provavelmente, pela baixa viscosidade desses líquidos. Do mesmo modo, o estranho comportamento das curvas do mel puro foi causado pela limitação do torque máximo que o reômetro pode impor ( $T = 200\mu Nm$ ), não representando nenhum fenômeno reológico.

Dessa maneira, torna-se necessário utilizarmos alguma metodologia para tratar os resultados gerados pelo reômetro, a fim de obtermos as viscosidades das soluções com maior precisão. Por simplicidade, definimos um método iterativo que pode ser descrito pelos seguintes passos: calcula-se a média aritmética de todas as viscosidades medidas, obtém-se uma nova média considerando apenas os pontos que apresentam erro menor do que 40% em relação a esse valor, calcula-se mais outra média, com os valores discrepantes em menos de 20% da última, faz-se, em seguida, o mesmo com as viscosidades que diferem menos de 10% dessa outra medida e, por fim, eliminam-se todos os pontos com erro maior que 10% em relação à última média. A média aritmética dos pontos restantes foi considerada, por nós, como a representação mais fiel da viscosidade absoluta da solução em questão.

Chegamos, assim, à seguinte tabela:

<b>Massa de Mel (g)</b>	<b>Massa de Água (g)</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Viscosidade (Pa.s)</b>
20,01	80,00	<b>20,01%</b>	0,0013
40,02	60,05	<b>39,99%</b>	0,0029
59,99	40,01	<b>59,99%</b>	0,0113
80,07	20,03	<b>79,99%</b>	0,1043
100,00	0,00	<b>100,00%</b>	19,2231
<b>Massa de Glicerina (g)</b>	<b>Massa de Água (g)</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Viscosidade (Pa.s)</b>
20,03	80,02	<b>20,02%</b>	0,0011
40,03	60,02	<b>40,01%</b>	0,0028
60,05	40,02	<b>60,01%</b>	0,0086
80,03	20,01	<b>80,00%</b>	0,0435
100,00	0,00	<b>100,00%</b>	0,7791

Tabela 3 – Viscosidades das Soluções de Mel e de Glicerina

Paralelamente às medições acima, também descobrimos os índices de refração das soluções citadas, através de um refratômetro de bancada da marca **Quimis**, modelo Q-767B. Essa informação adicional, como já falamos, nos indicou que tais índices são muito próximos ao do acrílico ( $n=1,49$ ) e do vidro ( $n=1,50$ ), o que é vantajoso para nossa visualização. O índice de refração da água deionizada é  $n=1,33$  e os outros podem ser consultados abaixo:

<b>Massa de Mel (g)</b>	<b>Massa de Água (g)</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Índice de Refração</b>
20,01	80,00	<b>20,00%</b>	1,36
40,02	60,05	<b>40,02%</b>	1,39
59,99	40,01	<b>60,00%</b>	1,42
80,07	20,03	<b>80,01%</b>	1,46
100,00	0,00	<b>100,00%</b>	1,50
<b>Massa de Glicerina (g)</b>	<b>Massa de Água (g)</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Índice de Refração</b>
20,03	80,02	<b>20,02%</b>	1,36
40,03	60,02	<b>40,01%</b>	1,38
60,05	40,02	<b>60,01%</b>	1,41
80,03	20,01	<b>80,00%</b>	1,44
100,00	0,00	<b>100,00%</b>	1,47

Tabela 4 – Índices de Refração das Soluções de Mel e de Glicerina

Com todos essas medidas em mãos, traçamos gráficos que relacionam as concentrações das soluções com os respectivos valores de viscosidade, massa específica e índice de refração. Os referidos gráficos, com curvas ajustadas, estão dispostos nas páginas a seguir.

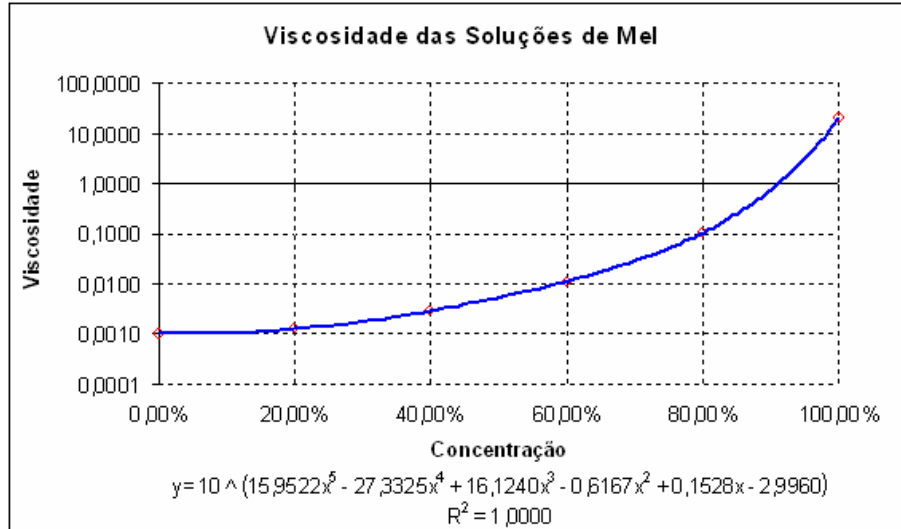


Figura 24 – Curva de Viscosidade das Soluções de Mel

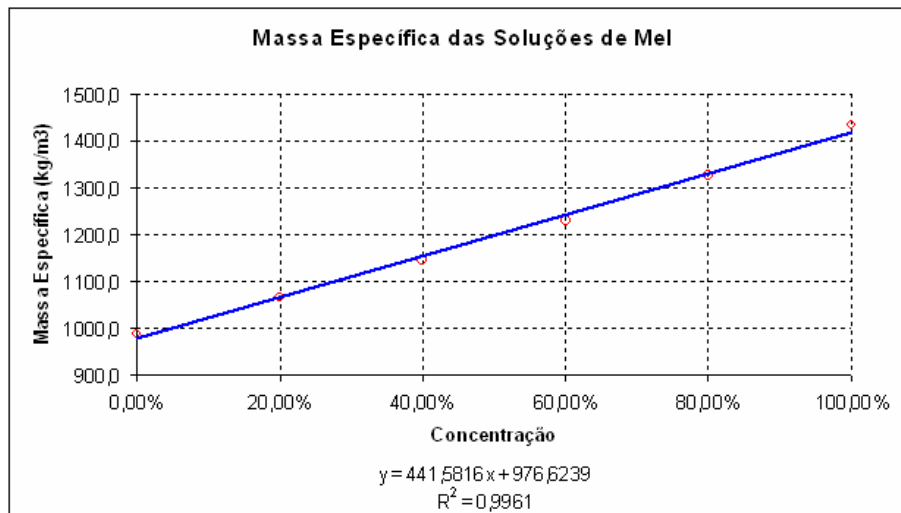


Figura 25 – Curva de Massa Específica das Soluções de Mel

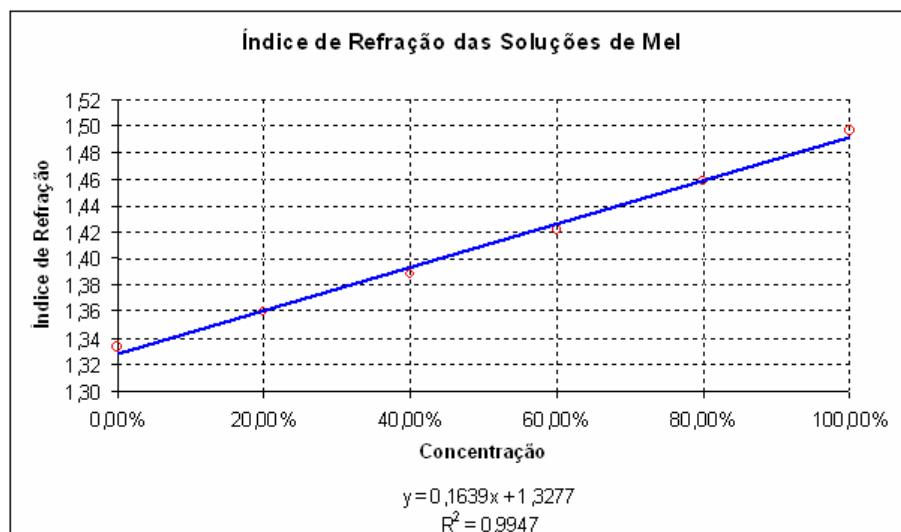


Figura 26 – Curva de Índice de Refração das Soluções de Mel

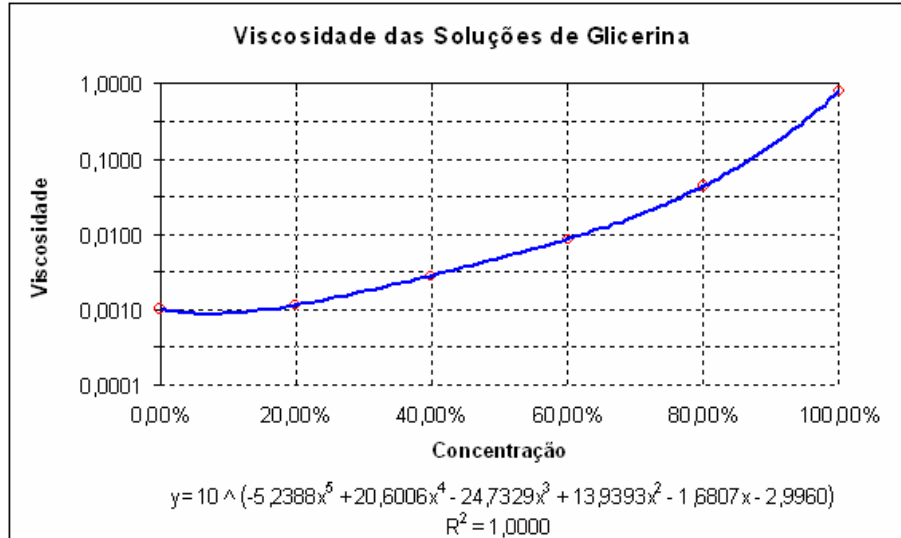


Figura 27 – Curva de Viscosidade das Soluções de Glicerina

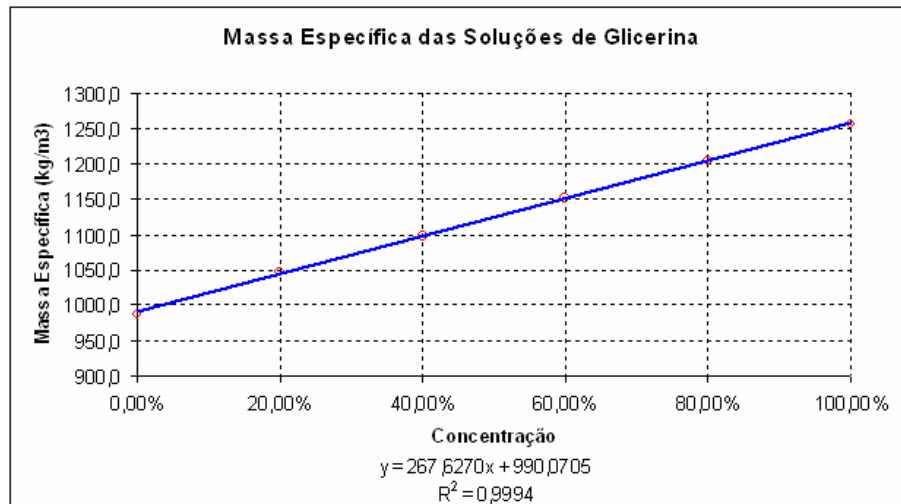


Figura 28 – Curva de Massa Específica das Soluções de Glicerina

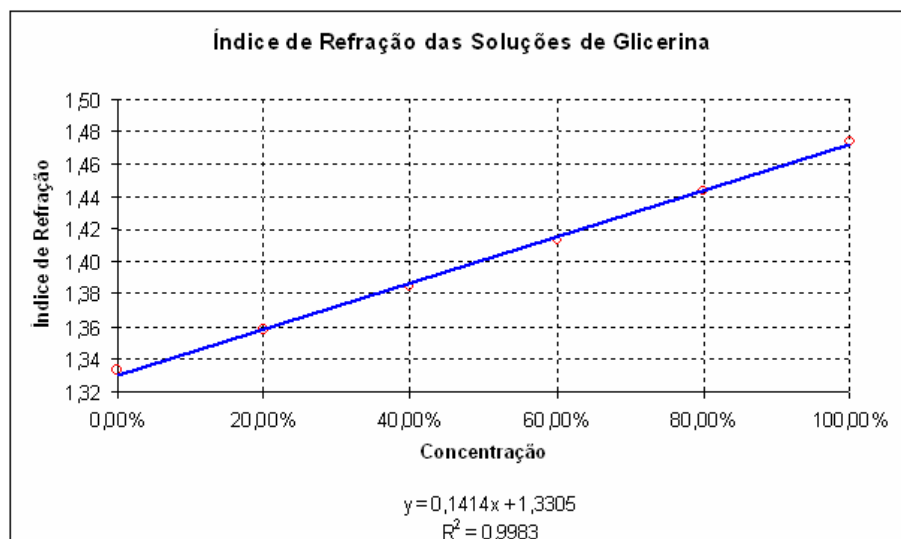


Figura 29 – Curva de Índice de Refração das Soluções de Glicerina

A partir das equações matemáticas dos ajustes de curvas, foi possível, então, estimar as razões de viscosidades para diversos pares de fluidos com as mesmas massas específicas. É essencial deixar claro que esses cálculos foram baseados em funções plotadas sobre dados experimentais, através do Método dos Mínimos Quadrados, e, portanto, não fornecem resultados de alta precisão, mas apenas aproximações satisfatórias das grandezas desejadas.

A boa prática científica nos ensina que comparações experimentais, como as que desejamos executar nesse trabalho, devem discutir tanto casos limite, quanto casos mais próximos do equilíbrio teórico, mantendo uma simetria em relação a esse. Visto que, em nosso estudo, o equilíbrio é representado pela razão de viscosidades  $\mu_1/\mu_2 = 1$ , decidimos que os testes de visualização seriam realizados para quatro razões de viscosidades diferentes, em progressão geométrica, sendo duas maiores e duas menores que esse valor. Para escolhermos o conjunto de fluidos que utilizaríamos, montamos, então, a seguinte tabela de alternativas:

Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Concentração da Solução de Mel (%)	Concentração da Solução de Glicerina (%)	Viscosidade da Solução de Mel (Pa.s)	Viscosidade da Solução de Glicerina (Pa.s)	Razão de Viscosidades [Glicerina/Mel]
990,1	3,05%	0,00%	0,0010	0,0010	0,99
1003,5	6,08%	5,00%	0,0010	0,0009	0,87
1016,8	9,11%	10,00%	0,0011	0,0009	0,85
1030,2	12,14%	15,00%	0,0011	0,0010	0,90
1043,6	15,17%	20,00%	0,0011	0,0011	1,01
1057,0	18,20%	25,00%	0,0012	0,0014	1,15
1070,4	21,23%	30,00%	0,0013	0,0017	1,34
1083,7	24,26%	35,00%	0,0014	0,0022	1,55
1097,1	27,29%	40,00%	0,0016	0,0028	1,79
1110,5	30,32%	45,00%	0,0018	0,0037	2,05
1123,9	33,35%	50,00%	0,0021	0,0048	2,34
1137,3	36,38%	55,00%	0,0024	0,0063	2,66
1150,6	39,41%	60,00%	0,0028	0,0086	3,06
1164,0	42,44%	65,00%	0,0033	0,0120	3,59
1177,4	45,47%	70,00%	0,0040	0,0174	4,33
1190,8	48,50%	75,00%	0,0049	0,0266	5,46
1204,2	51,53%	80,00%	0,0060	0,0435	7,26
1214,9	53,95%	84,00%	0,0071	0,0682	9,58
1228,3	56,98%	89,00%	0,0089	0,1299	14,54
1241,6	60,02%	94,00%	0,0114	0,2737	24,11
1255,0	63,05%	99,00%	0,0147	0,6464	44,06

Tabela 5 – Razões de Viscosidades para Pares de Soluções com Mesma Massa Específica

Verificando as informações acima, notamos facilmente que, a partir da razão de viscosidades  $\mu_1/\mu_2 \cong 9$ , esse parâmetro adimensional torna-se muito sensível a perturbações na composição dos fluidos. Selecionar pares de líquidos a partir desse ponto não é desejável, pois o método de preparação das soluções não permite um controle fino de suas concentrações.

Por esse motivo, estabelecemos como casos extremos de nossa investigação as razões de viscosidades  $\mu_1/\mu_2 \cong 8$  e sua inversa  $\mu_1/\mu_2 \cong 1/8$ . O par intermediário, a saber,

$\mu_1/\mu_2 \cong 2$  e  $\mu_1/\mu_2 \cong 1/2$ , foi definido de maneira a criar uma progressão geométrica. Destacamos que as soluções necessárias para escoamentos com razões de viscosidades inversas são as mesmas, bastando trocar o fluido deslocador pelo deslocado. Assim sendo, da tabela 5, concluímos que nossos experimentos fariam uso das seguintes soluções:

	Fluido Deslocador	Fluido Deslocado
<b>Caso 1</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 1/8$	Solução de Mel 53%	Solução de Glicerina 82%
<b>Caso 2</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 1/2$	Solução de Mel 30%	Solução de Glicerina 45%
<b>Caso 3</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 2$	Solução de Glicerina 45%	Solução de Mel 30%
<b>Caso 4</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 8$	Solução de Glicerina 82%	Solução de Mel 53%

Tabela 6 – Soluções de Referência para os Casos Analisados

Enfatizamos, mais uma vez, que tais valores serviram apenas como referência, já que, antes de cada simulação realizada, as concentrações dos líquidos eram ajustadas de maneira a encontrar a verdadeira combinação que fornecia as massas específicas mais parecidas. As razões de viscosidades eram novamente aferidas, eliminando erros de aproximação.

Essas medições seguiram o mesmo procedimento descrito anteriormente nessa seção, fazendo uso dos aparelhos e instrumentos já citados. Todavia, como os escoamentos exigiam maiores volumes de fluidos, para cada solução, eram preparados lotes de 15kg quilos, divididos em recipientes de 5kg cada. Desse modo, tivemos que substituir a balança **Bioprecisa** pela balança **Gehaka BG8000**, de maior faixa de leitura. A homogeneização das soluções também foi automatizada, por meio de misturadores **Fisatom**, modelo 723, regulados em 120rpm .

Era durante essa mistura que adicionávamos o corante azul II para fins alimentícios, da **Arcolor**, às soluções de glicerina, e o sorbato de potássio ( $C_6H_7O_2K$ ), do fabricante **Pluriquímica**, às soluções de mel, na quantidade de 0,2% em massa do soluto. Para confirmarmos que esses novos elementos não alteravam significativamente as características das respectivas soluções, foram feitas as comparações abaixo:

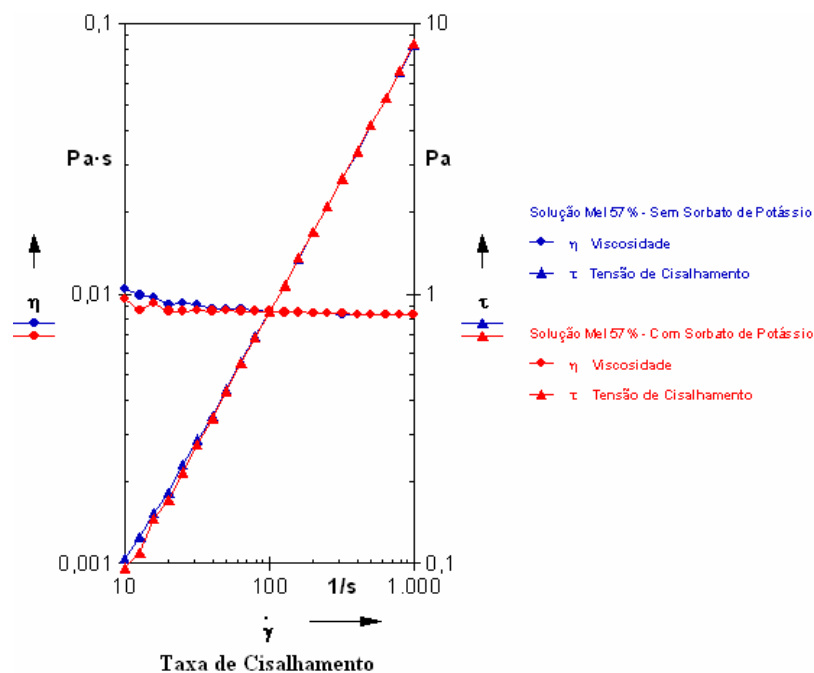


Figura 30 – Flow Curves das Soluções de Mel 57% Sem e Com Sorbato de Potássio

Solução de Mel 57%	Sem Sorbato de Potássio	Com Sorbato de Potássio
<b>Viscosidade (Pa.s)</b>	0,0086	0,0086

Tabela 7 – Viscosidades das Soluções de Mel 57% Sem e Com Sorbato de Potássio

Solução de Mel 57%	Sem Sorbato de Potássio	Com Sorbato de Potássio
<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1226,4	1226,9

Tabela 8 – Massas Específicas das Soluções de Mel 57% Sem e Com Sorbato de Potássio

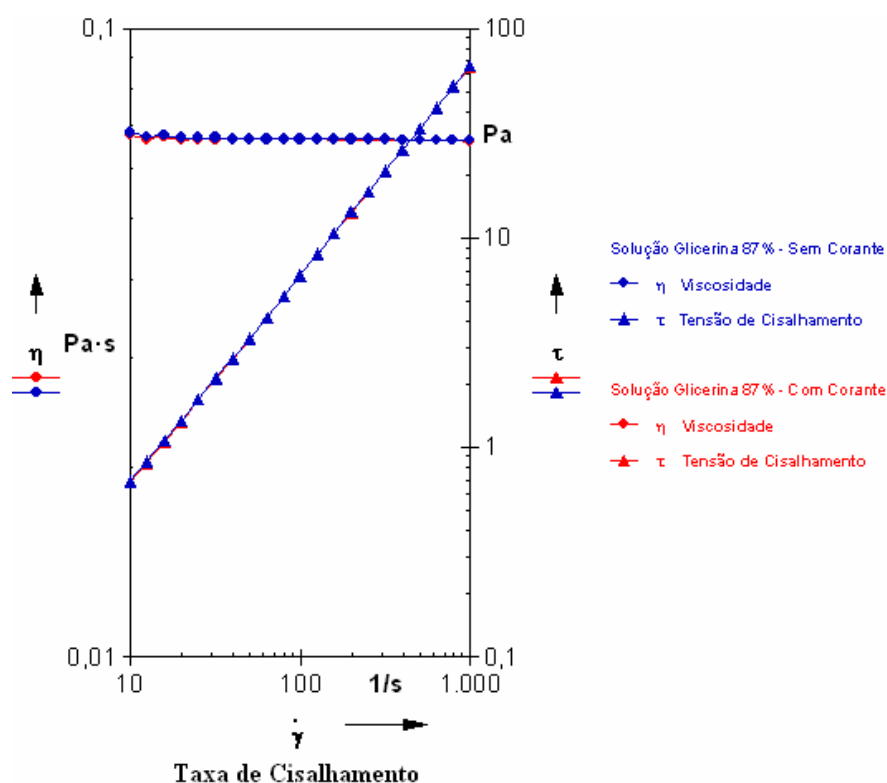


Figura 31 – Flow Curves das Soluções de Glicerina 87% Sem e Com Corante

Solução de Glicerina 87%	Sem Corante	Com Corante
<b>Viscosidade (Pa.s)</b>	0,0668	0,0666

Tabela 9 – Viscosidades das Soluções de Glicerina 87% Sem e Com Corante

Solução de Glicerina 87%	Sem Corante	Com Corante
<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1218,9	1219,3

Tabela 10 – Massas Específicas das Soluções de Glicerina 87% Sem e Com Corante

Seguindo a mesma motivação de garantir a reprodutibilidade dos resultados experimentais, também se verificou que a evaporação de água nas soluções de mel e a absorção de umidade nas de glicerina não afetavam consideravelmente suas respectivas propriedades. Para tanto, medimos as viscosidades e as massas específicas de soluções das duas substâncias logo após serem preparadas e uma semana depois de terem ficado armazenadas nos vasos de pressão de nossa bancada experimental, conforme vemos nas páginas seguintes.

Ressalta-se que a solução utilizada nesses testes continha sorbato de potássio, de forma a se evitar a deterioração da mesma, pela proliferação de microorganismos.

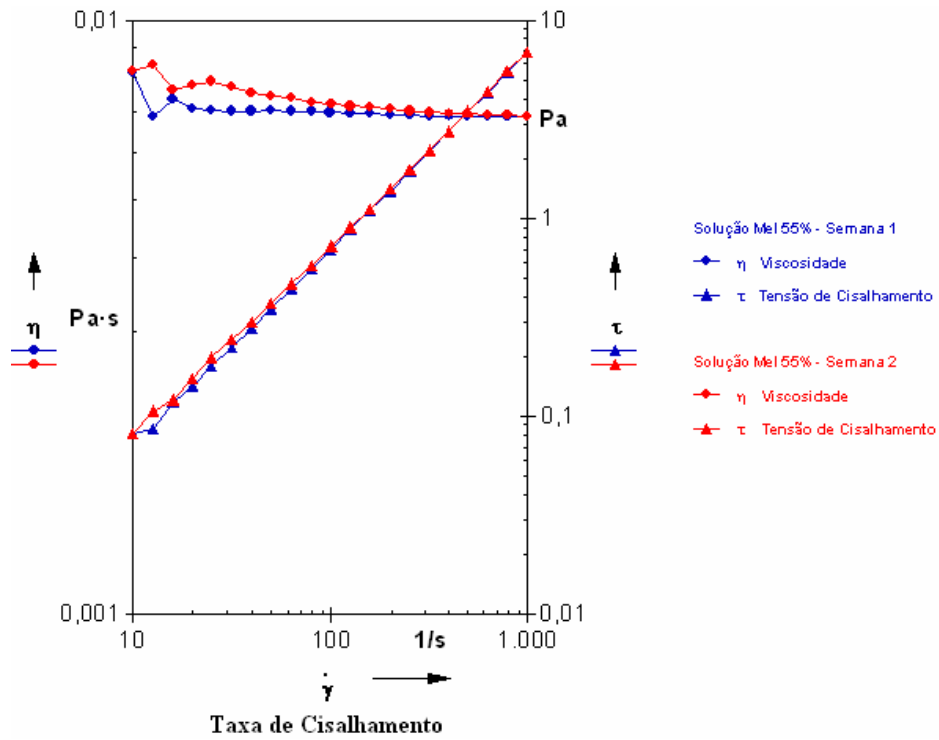


Figura 32 – Flow Curves da Solução de Mel 55% nas Semanas 1 e 2

Solução de Mel 55%	Semana 1	Semana 2
Viscosidade (Pa.s)	0,0070	0,0073

Tabela 11 – Viscosidades da Solução de Mel 55% nas Semanas 1 e 2

Solução de Mel 55%	Semana 1	Semana 2
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	1217,5	1217,9

Tabela 12 – Massas Específicas da Solução de Mel 55% nas Semanas 1 e 2

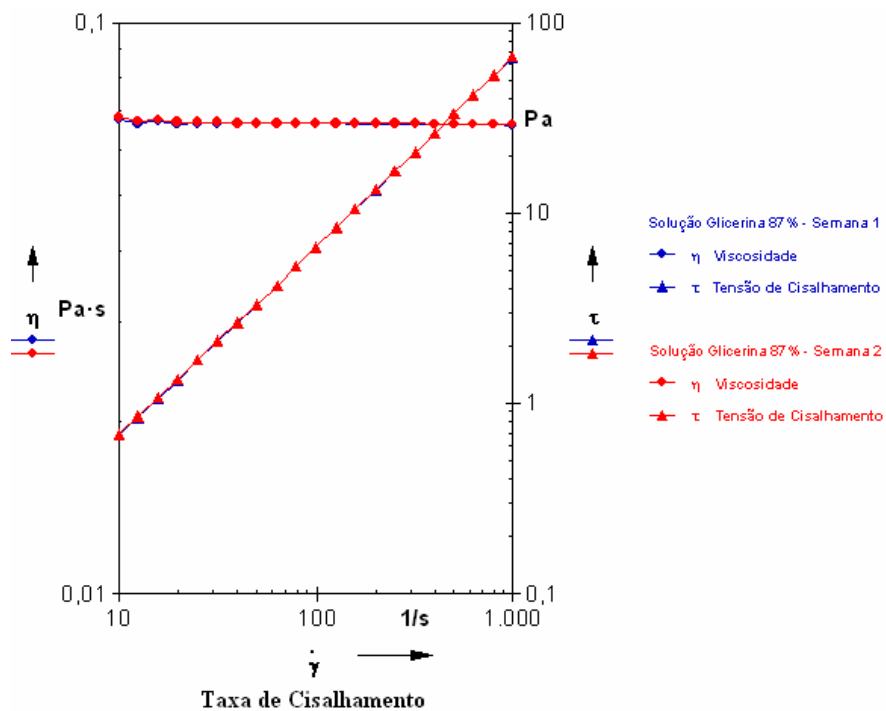


Figura 33 – Flow Curves da Solução de Glicerina 87% nas Semanas 1 e 2

Solução de Glicerina 87%	Semana 1	Semana 2
Viscosidade (Pa.s)	0,0668	0,0667

Tabela 13 – Viscosidades da Solução de Glicerina 87% nas Semanas 1 e 2

Solução de Glicerina 87%	Semana 1	Semana 2
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	1218,8	1218,3

Tabela 14 – Massas Específicas da Solução de Glicerina 87% nas Semanas 1 e 2

Lembramos também, que, na solução analisada acima, já estava adicionado o corante anteriormente mencionado, a fim de reproduzir as condições reais dos experimentos. Assim, por tudo o aqui exposto, não só definimos as soluções de referência que teríamos que fabricar para as nossas simulações, como também garantimos um controle sobre os parâmetros reológicos de interesse.

#### 4.2.2- Vazão de Trabalho

Para definirmos as vazões de trabalho em nossos experimentos, recorreremos, mais uma vez, à análise dimensional. Assim, tomamos o já mencionado número de Reynolds, dado por:

$$Re = \frac{\rho \cdot D_h \cdot \bar{u}}{\mu} \quad (36)$$

Onde  $\rho$  e  $\mu$  são, respectivamente, a massa específica e a viscosidade dinâmica do fluido considerado,  $D_h$  é o diâmetro hidráulico para espaços anulares e  $\bar{u}$  é a velocidade média do escoamento.

A fim de manter uma equivalência de escala, sabemos, pela própria definição de correlação adimensional, que o número de Reynolds do escoamento realizado em nossa planta experimental deve ser igual àquele obtido em campo, no poço de petróleo. Portanto, temos:

$$\left\langle \frac{\rho \cdot D_h \cdot \bar{u}}{\mu} \right\rangle_{poço} = \left\langle \frac{\rho \cdot D_h \cdot \bar{u}}{\mu} \right\rangle_{planta} \quad (37)$$

Considerando, por simplificação, que a razão entre a massa específica e a viscosidade dinâmica dos fluidos na planta experimental e no poço são as mesmas e reconhecendo que a velocidade média do escoamento é dada por  $\bar{u} = Q/A_n$ , onde  $Q$  é a vazão volumétrica e  $A_n$  é a área da seção transversal do anular, fazemos:

$$\left\langle \frac{QD_h}{A_n} \right\rangle_{poço} = \left\langle \frac{QD_h}{A_n} \right\rangle_{planta} \quad (38)$$

Conforme visto anteriormente, toda a nossa montagem experimental foi construída baseada na razão de aspecto  $\langle D_h/D_i \rangle_{poço} = \langle D_h/D_i \rangle_{planta} = 0,80$ . Dessa maneira, podemos calcular o diâmetro hidráulico e a área do espaço anular, tanto do poço real, quanto de nosso aparato de testes, em função exclusivamente do diâmetro interno.

Para o poço de petróleo:

$$\langle D_h \rangle_{poço} = \langle D_e - D_i \rangle_{poço} = \langle 0,8D_i \rangle_{poço} \quad (39)$$

$$\langle A_n \rangle_{poço} = \left\langle \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) \right\rangle_{poço} = \langle 1,759D_i^2 \rangle_{poço} \quad (40)$$

Aplicando o mesmo raciocínio ao nosso arranjo, chegamos a relações similares:

$$\langle D_h \rangle_{planta} = \langle D_e - D_i \rangle_{planta} = \langle 0,8D_i \rangle_{planta} \quad (41)$$

$$\langle A_n \rangle_{planta} = \left\langle \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) \right\rangle_{planta} = \langle 1,759D_i^2 \rangle_{planta} \quad (42)$$

Substituindo as equações (39), (40), (41) e (42) na equação (38), obtemos, então:

$$\left\langle \frac{0,4548Q}{D_i} \right\rangle_{poço} = \left\langle \frac{0,4548Q}{D_i} \right\rangle_{planta} \quad (43)$$

Simplificando:

$$\left\langle \frac{Q}{D_i} \right\rangle_{poço} = \left\langle \frac{Q}{D_i} \right\rangle_{planta} \quad (44)$$

Fica evidente, portanto, que a razão entre as vazões de laboratório e de campo depende apenas da razão entre os diâmetros internos dos respectivos espaços anulares, como a seguir:

$$\frac{Q_{poço}}{Q_{planta}} = \frac{\langle D_i \rangle_{poço}}{\langle D_i \rangle_{planta}} \quad (45)$$

Retornando às informações coletadas sobre os poços de petróleo atualmente em operação, podemos tomar como valor característico do diâmetro externo da coluna de revestimento 5", ou seja,  $\langle D_i \rangle_{poço} = 127mm$ . Como o tubo interno de nossa planta experimental possui diâmetro externo igual a 30mm, concluímos que:

$$Q_{planta} = 0,2362Q_{poço} \quad (46)$$

Da mesma forma, a velocidade média do escoamento no anular da planta é obtida por:

$$\bar{u}_{planta} = \frac{Q_{planta}}{\langle A_n \rangle_{planta}} = \frac{0,2362Q_{poço}}{\langle A_n \rangle_{planta}} \quad (47)$$

Substituindo a equação (42) na relação anterior, encontramos:

$$\bar{u}_{planta} = \frac{0,2362Q_{poço}}{\langle 1,759D_i^2 \rangle_{planta}} = 149,2Q_{poço} \quad (48)$$

Após todos esses cálculos, montamos a tabela a seguir, relacionando as vazões comumente praticadas em poços de petróleo reais, dadas em barris por minuto, com as vazões e velocidades correspondentes em nosso aparato experimental:

Vazão no Poço Real (bbl/min)	Vazão no Poço Real (m <sup>3</sup> /s)	Vazão na Planta Experimental (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade na Planta Experimental (m/s)
0,25	0,000678	0,000160	0,1012
0,5	0,001356	0,000320	0,2023
1	0,002713	0,000641	0,4046
2	0,005425	0,001281	0,8092

Tabela 15 – Alternativas de Vazões e Velocidades

Antes de prosseguirmos, devemos estar conscientes que desejávamos manter uma mesma vazão de trabalho em todas as nossas simulações, a fim de evitarmos que os resultados fossem influenciados por qualquer outro parâmetro além da razão de viscosidades entre o fluido deslocador e o deslocado. Um outro requisito observado foi se verificar um regime laminar de escoamento, para sermos coerentes com as hipóteses adotadas nesse estudo.

Tomando como referência a tabela 6, pudemos descobrir qual dos fluidos a serem utilizados seria o limitante em relação à velocidade máxima de deslocamento. Abaixo, apresentamos as referidas soluções e seus respectivos fatores  $\rho.D_h/\mu$ :

Solução	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (Pa.s)	$\rho.D_h/\mu$ (s/m)
<b>Solução de Mel 30%</b>	1109,1	0,0018	15205
Solução de Mel 53%	1210,7	0,0069	4232
Solução de Glicerina 45%	1110,5	0,0037	7262
Solução de Glicerina 82%	1209,5	0,0541	536

Tabela 16 – Solução Limitante da Velocidade Máxima

Das informações tabeladas, constatamos que o fluido limitante é a solução de mel 30%. Sabendo que a transição laminar-turbulento ocorre por volta de  $Re_c = 2300$ , fica fácil calcular a velocidade máxima que pode ser imposta em nossos experimentos:

$$\bar{u}_{max} \cong \frac{Re_c}{15205} \cong 0,1513m/s \quad (49)$$

Sendo assim, consultando a tabela 15, optamos por representar, em nosso projeto, escoamentos no poço real com vazão  $Q_{poço} \cong 0,25bbl$ , ou seja, trabalhar com uma vazão experimental de aproximadamente  $Q_{planta} \cong 0,000160m^3/s$ . Realizamos, então, análises preliminares em nossa bancada experimental para estimarmos a pressão inicial a ser exercida sobre o recipiente que continha o fluido deslocador de modo a gerar essa vazão de trabalho.

Os testes consistiram em escoar uma solução de mel 30%, com pressão variando gradualmente entre eles, medindo-se a vazão fornecida em cada caso. Através desse método, constatamos que a pressão inicial do reservatório deveria ser  $p \cong 0,5 \text{kgf} / \text{cm}^2 = 49 \text{kPa}$ , que foi definida, assim, como nossa pressão de trabalho.

Um comentário adicional pertinente é que a velocidade média de escoamento escolhida para nossas experiências é bastante favorável ao nosso método de visualização. Isso porque essa velocidade é compatível com a de aquisição de imagens pela máquina.

#### 4.2.3- Descrição do Experimento

Em todos os nossos experimentos, seguimos um rigoroso procedimento para obtermos resultados confiáveis e de boa qualidade. Destacamos, aqui, que a configuração da nossa planta experimental, os métodos de preparação dos fluidos e de medição de suas propriedades, assim como os instrumentos e aparelhos por nós utilizados, já foram anteriormente descritos nesse capítulo, e, portanto, não nos repetiremos sobre esses assuntos, de forma a tornar o texto mais breve.

Antes de partimos para a nossa bancada experimental, nos dedicávamos à produção dos fluidos a serem utilizados em cada caso. Por causa do espaço de armazenamento, limitado pelos quatro reservatórios de acrílico de nossa mesa de trabalho, só eram preparados os fluidos necessários ao teste em questão, em volume suficiente para realizarmos, no máximo, duas operações de deslocamento.

Primeiramente, fabricávamos soluções aproximadamente iguais às de referência, tomando por base a tabela 6. Obviamente, por motivos práticos, chegar exatamente às mesmas concentrações seria uma tarefa árdua e, como veremos, desnecessária. Isso porque, uma vez obtidas as soluções preliminares, íamos ajustando as suas massas específicas, através da diluição do fluido mais denso, até que alcançássemos uma razão de densidades  $\rho_1 / \rho_2 = 1$ . Em seguida, os líquidos eram caracterizados reologicamente, com relação às suas viscosidades dinâmicas.

Determinadas as grandezas de interesse, cada solução era colocada em um reservatório distinto de nossa planta experimental. A passagem do tubo interno para o espaço anular era, então, fechada, prestando-se atenção para que o movimento de rotação característico do tampão não girasse o tubo interno, ocasionando excentricidades indesejadas.

Nesse momento, o líquido a ser deslocado era injetado no anular, com as válvulas superiores de escape de ar abertas. Após a completação dessa região, todo o conjunto era inclinado para permitir a saída de bolhas de ar remanescentes, sendo o recipiente de descarte colocado sobre a mesa, de forma a manter as mangueiras preenchidas com fluido. Essa precaução era importante, pois verificamos que, ao se iniciar a simulação, ar exterior tendia a retornar por essas passagens, perturbando o escoamento.

Em seguida, alterávamos a configuração das válvulas, direcionando o fluido deslocador para o tubo interno. Antes disso, contudo, os resquícios da primeira solução, ainda presentes no sistema de distribuição, eram eliminados através do registro de descarte. A válvula de alívio do tubo, mantida aberta durante todo o processo, garantia o escape do ar, sendo a retirada das eventuais bolhas restantes facilitada pela inclinação do arranjo.

Com os fluidos em posição para se iniciar os testes, ajustávamos as máquinas fotográficas em suas respectivas posições e desligávamos a luz do laboratório, iluminando as áreas de visualização apenas com as luminárias já citadas. Nesse ponto, pressurizávamos o reservatório do fluido deslocador até  $p = 0,5 \text{kgf} / \text{cm}^2$ . Uma vez atingido tal valor, mantínhamos um pequeno fluxo de ar comprimido sendo injetado, de modo a evitar uma queda acentuada da pressão ao longo da simulação.

Imediatamente, liberávamos a passagem do líquido deslocador, ao mesmo tempo em que abríamos o tampão, permitindo o início do deslocamento de um fluido por outro. O processo começava, então, a ser fotografado e cronometrado. Passados 60 segundos, o experimento era encerrado pelo fechamento da entrada do fluido deslocador, permitindo que calculássemos a vazão média do escoamento através da diferença de altura do nível do reservatório.

Após cada teste, todo o aparato experimental que havia estado em contato com as soluções utilizadas, incluindo não só os tubos, como também as mangueiras e recipientes, eram cuidadosamente limpos. Apesar de exaustivo, tal cuidado era essencial, já que impurezas afetam sensivelmente a tensão superficial da interface e a transparência dos tubos de acrílico.

## 5- Resultados e Discussão

Neste capítulo, são discutidos os resultados obtidos através da abordagem experimental mencionada anteriormente, onde um fluido newtoniano deslocou outro ao longo de um espaço anular horizontal não retilíneo. Eles são apresentados na forma de conjuntos de fotografias que ilustram a evolução dos escoamentos em estudo, a partir de dois ângulos diferentes.

É importante lembrar que o parâmetro de interesse desse trabalho é a razão de viscosidades, sendo, portanto, investigados quatro deslocamentos com valores distintos dessa grandeza. Com base nas seqüências de imagens, analisamos a performance da substituição em cada caso, através do formato e da estabilidade da interface entre os líquidos, assim como de indícios de fluido não deslocado ao final do processo.

### 5.1- Caracterização dos Fluidos

Conforme já visto, as soluções preparadas para cada experimento foram caracterizadas em relação às suas viscosidades dinâmicas e massas específicas, antes de cada um dos testes de visualização. Os aparelhos e instrumentos utilizados, assim como a metodologia empregada na medição dessas propriedades e no tratamento dos dados, são os mesmos citados na seção “Seleção e Preparação dos Fluidos”.

Antes de prosseguirmos, achamos por bem comentar que, mesmo lançando mão de uma geometria “*double couette*” no reômetro, observamos falhas de medição significativas para baixas taxas de cisalhamento, nos casos em que as viscosidades dos fluidos eram menores que  $5 \cdot 10^{-3} Pa.s$ . Tal fato, provavelmente gerado por torques muito reduzidos, não impediu, contudo, o cálculo das respectivas viscosidades, já que claramente verificamos uma estabilização das curvas para taxas de cisalhamento mais altas.

Dessa maneira, as referidas “*flow curves*” e os valores das massas específicas dos fluidos são apresentados segundo os quatro escoamentos por nós realizados. Ressaltamos, mais uma vez, que as concentrações das soluções diferem daquelas apresentadas na tabela 6, por serem essas apenas referências preliminares. A partir do ajuste das massas específicas dos pares de líquidos de cada caso analisado, esses valores foram redefinidos conforme abaixo:

	<b>Fluido Deslocador</b>	<b>Fluido Deslocado</b>
<b>Caso 1</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 1/8$	Solução de Mel 54%	Solução de Glicerina 84%
<b>Caso 2</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 1/2$	Solução de Mel 33%	Solução de Glicerina 49%
<b>Caso 3</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 2$	Solução de Glicerina 49%	Solução de Mel 33%
<b>Caso 4</b> – $\mu_1/\mu_2 \cong 8$	Solução de Glicerina 84%	Solução de Mel 54%

Tabela 17 – Soluções Reais para os Casos Analisados

A seguir, apresentamos a caracterização reológica dos pares de fluidos de cada caso.

5.1.1- Caso 1

A- Solução de Mel 54%

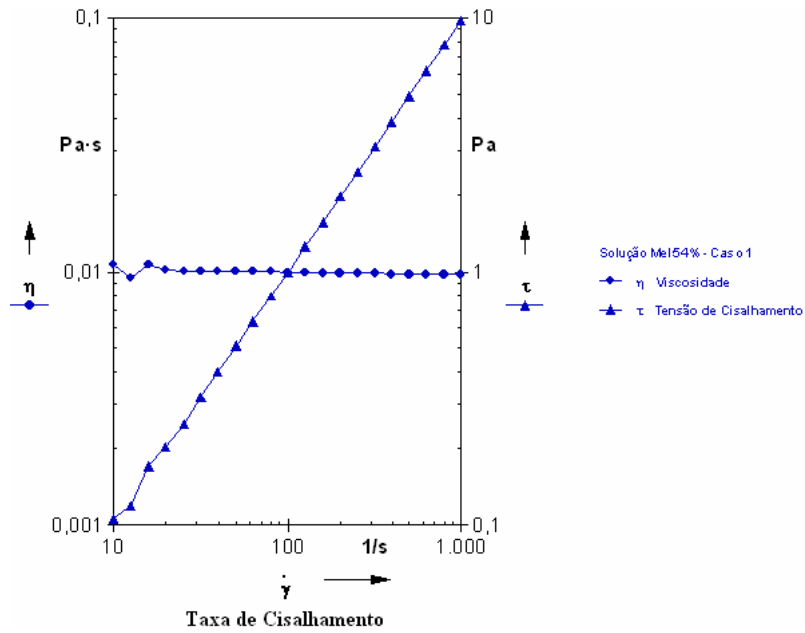


Figura 34 – Flow Curve da Solução de Mel 54% do Caso 1

Caso 1	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Mel 54%	0,0078	1213,6

Tabela 18 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Mel 54% do Caso 1

B- Solução de Glicerina 84%

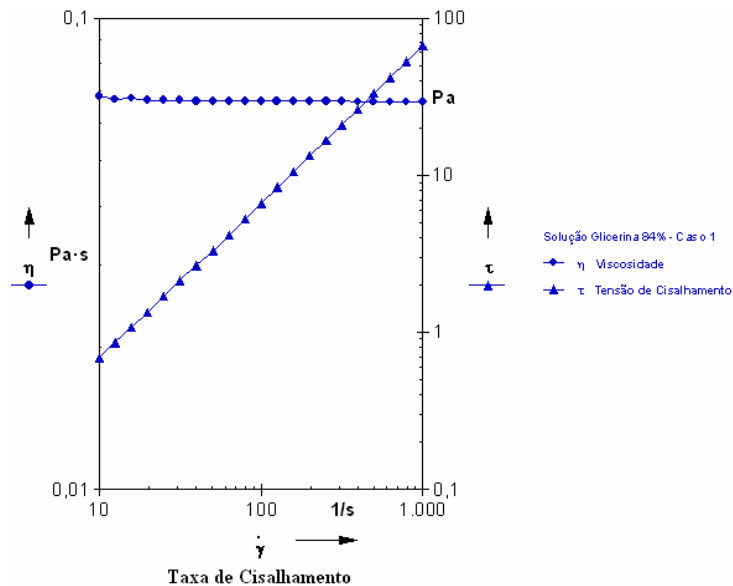


Figura 35 – Flow Curve da Solução de Glicerina 84% do Caso 1

Caso 1	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Glicerina 84%	0,0574	1211,0

Tabela 19 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Glicerina 84% do Caso 1

5.1.2- Caso 2

A- Solução de Mel 33%

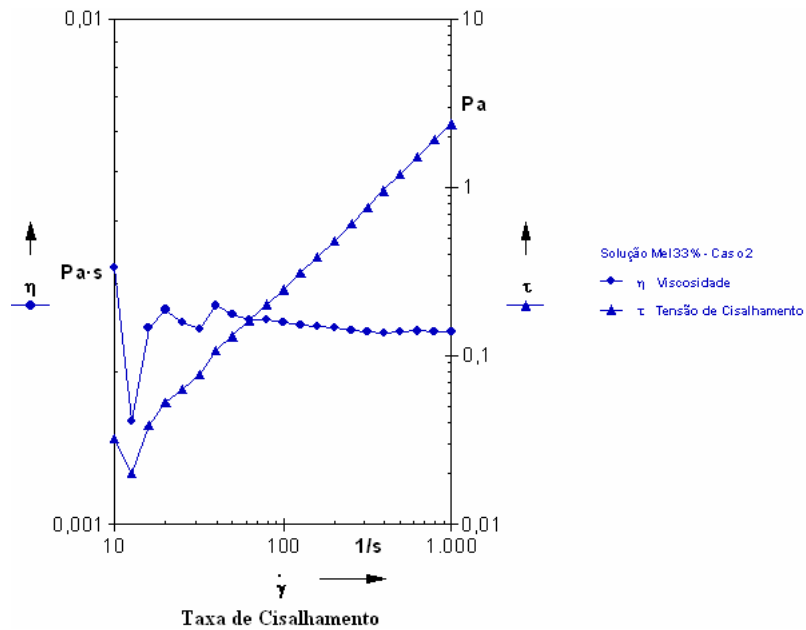


Figura 36 – Flow Curve da Solução de Mel 33% do Caso 2

Caso 2	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Mel 33%	0,0025	1120,0

Tabela 20 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Mel 33% do Caso 2

B- Solução de Glicerina 49%

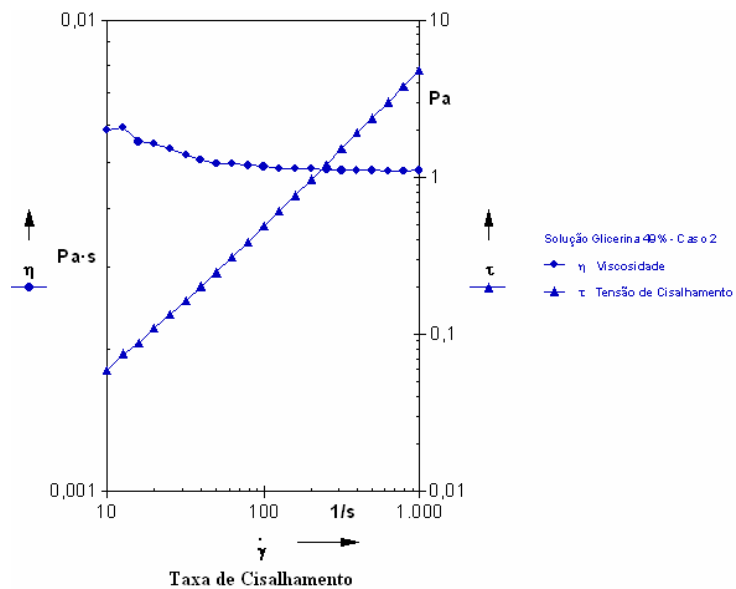


Figura 37 – Flow Curve da Solução de Glicerina 49% do Caso 2

Caso 2	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Glicerina 49%	0,0049	1122,2

Tabela 21 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Glicerina 49% do Caso 2

5.1.3- Caso 3

A- Solução de Glicerina 49%

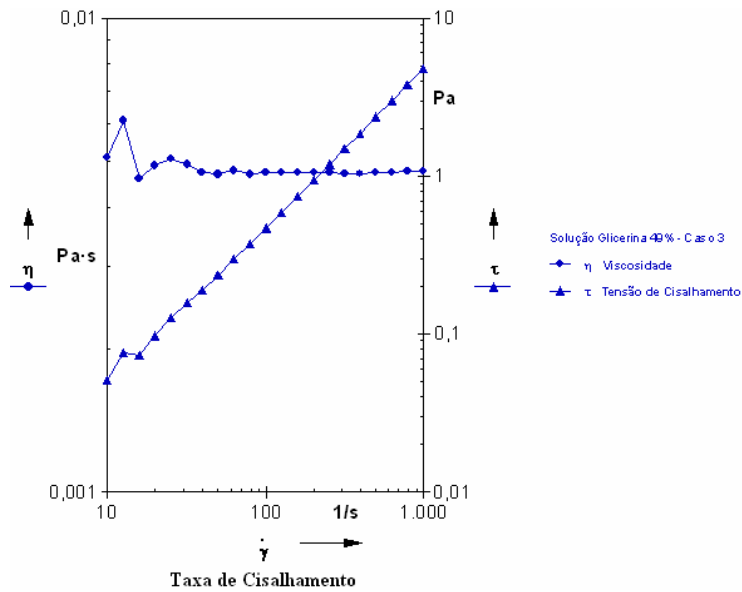


Figura 38 – Flow Curve da Solução de Glicerina 49% do Caso 3

Caso 3	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Glicerina 49%	0,0048	1121,8

Tabela 22 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Glicerina 49% do Caso 3

B- Solução de Mel 33%

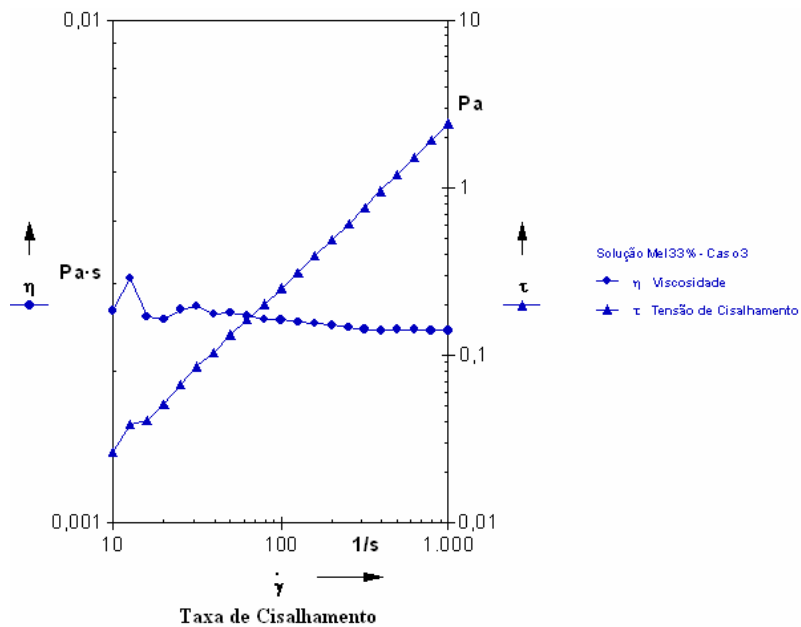


Figura 39 – Flow Curve da Solução de Mel 33% do Caso 3

Caso 3	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Mel 33%	0,0025	1118,6

Tabela 23 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Mel 33% do Caso 3

### 5.1.4- Caso 4

#### A- Solução de Glicerina 84%

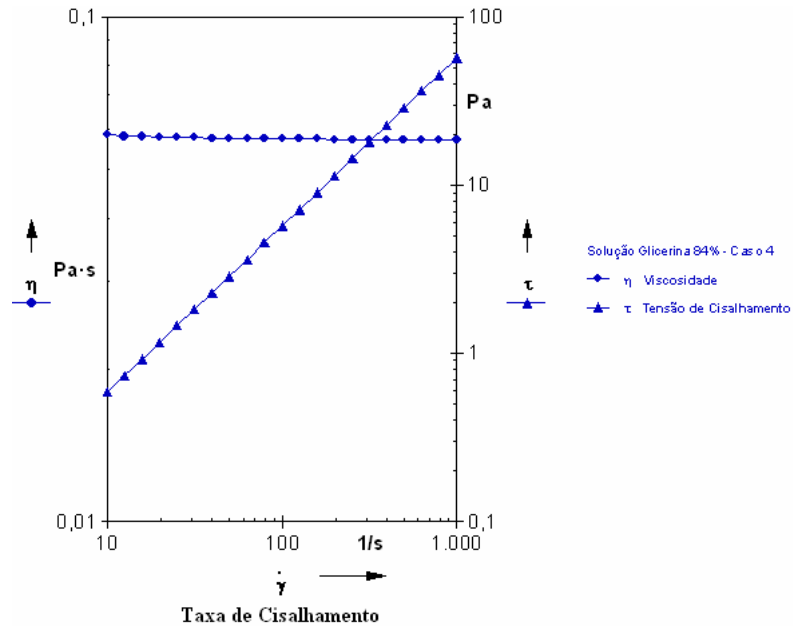


Figura 40 – *Flow Curve* da Solução de Glicerina 84% do Caso 4

Caso 4	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Glicerina 84%	0,0601	1214,9

Tabela 24 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Glicerina 84% do Caso 4

#### B- Solução de Mel 54%

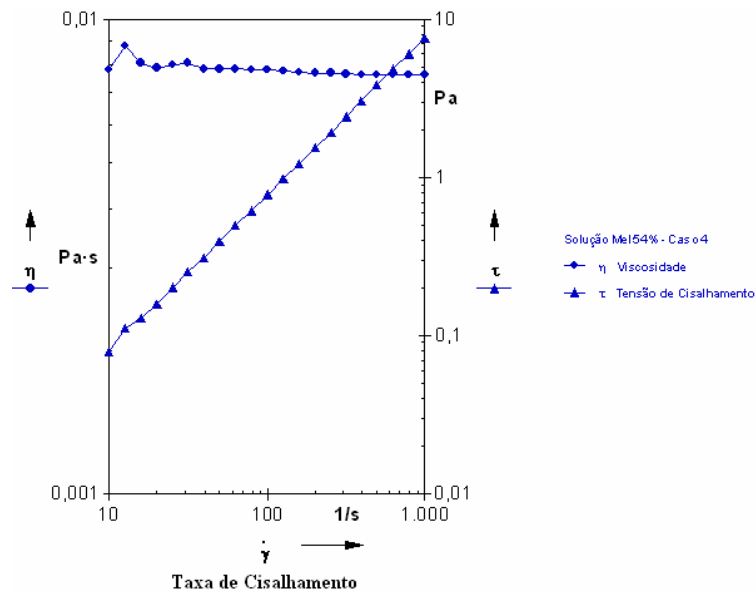


Figura 41 – *Flow Curve* da Solução de Mel 54% do Caso 4

Caso 4	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Solução de Mel 54%	0,0072	1204,7

Tabela 25 – Viscosidade e Massa Específica da Solução de Mel 54% do Caso 4

## 5.2- Testes de Visualização

A fim de resumir a caracterização das soluções utilizadas e calcular os valores reais de cada razão de viscosidades analisada, criamos a tabela abaixo:

	$\frac{\mu_1}{\mu_2}$	$\frac{\rho_1}{\rho_2}$	Fluido Deslocador		Fluido Deslocado	
			Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (Pa.s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Caso 1</b>	0,14	1,00	0,0078	1213,6	0,0574	1211,0
<b>Caso 2</b>	0,50	1,00	0,0025	1120,0	0,0049	1122,2
<b>Caso 3</b>	1,90	1,00	0,0048	1121,8	0,0025	1118,6
<b>Caso 4</b>	8,35	1,01	0,0601	1214,9	0,0072	1204,7

Tabela 26 – Resumo dos Testes Realizados

Como já discutido, desejávamos obter pares de fluidos deslocador-deslocado de mesma massa específica, de maneira a minimizar os efeitos de empuxo. Apesar dessa tarefa ser praticamente impossível, observamos que as razões de densidades em nossas simulações realmente ficaram muito próximas de  $\rho_1/\rho_2 = 1$ . Ademais, as razões de viscosidades verificadas foram similares às definidas como referência, confirmando as expectativas geradas pelas curvas de calibração indicadas no capítulo anterior.

Nas páginas a seguir, para cada um dos casos investigados, são apresentados dois conjuntos de imagens: o primeiro, com 10 fotografias, se refere à visualização lateral do arranjo de tubos e o segundo, com 9 fotografias, se refere à visualização superior do mesmo. Enfatizamos, ainda, que essas imagens não reproduzem todas as fotos tiradas nos experimentos, sendo apenas uma seleção representativa da evolução do processo de substituição, já que a seqüência completa possui uma quantidade muito maior de quadros.

A fim de melhor organizarmos a apresentação de cada caso, optamos por iniciá-los em páginas distintas. Ao final de cada item, mostramos, também, imagens em negativo que ajudam a visualizar os principais fenômenos observados, assim como o aspecto do escoamento, decorridos 20 segundos de teste.

### 5.2.1- Caso 1

O primeiro caso estudado teve, como fluido deslocador, uma solução de mel 54% e, como fluido deslocado, uma solução de glicerina 84%. A razão de viscosidades e a razão de densidades observadas foram, respectivamente,  $\mu_1/\mu_2 = 0,14$  e  $\rho_1/\rho_2 = 1,00$ . A vazão volumétrica calculada foi  $Q \cong 0,000175m^3 / s$  e a completa substituição do fluido deslocado ocorreu em  $t \cong 53s$ . Abaixo, podem ser consultadas imagens da evolução de nossa simulação experimental, primeiramente a partir da câmera lateral e, em seguida, da câmera superior:

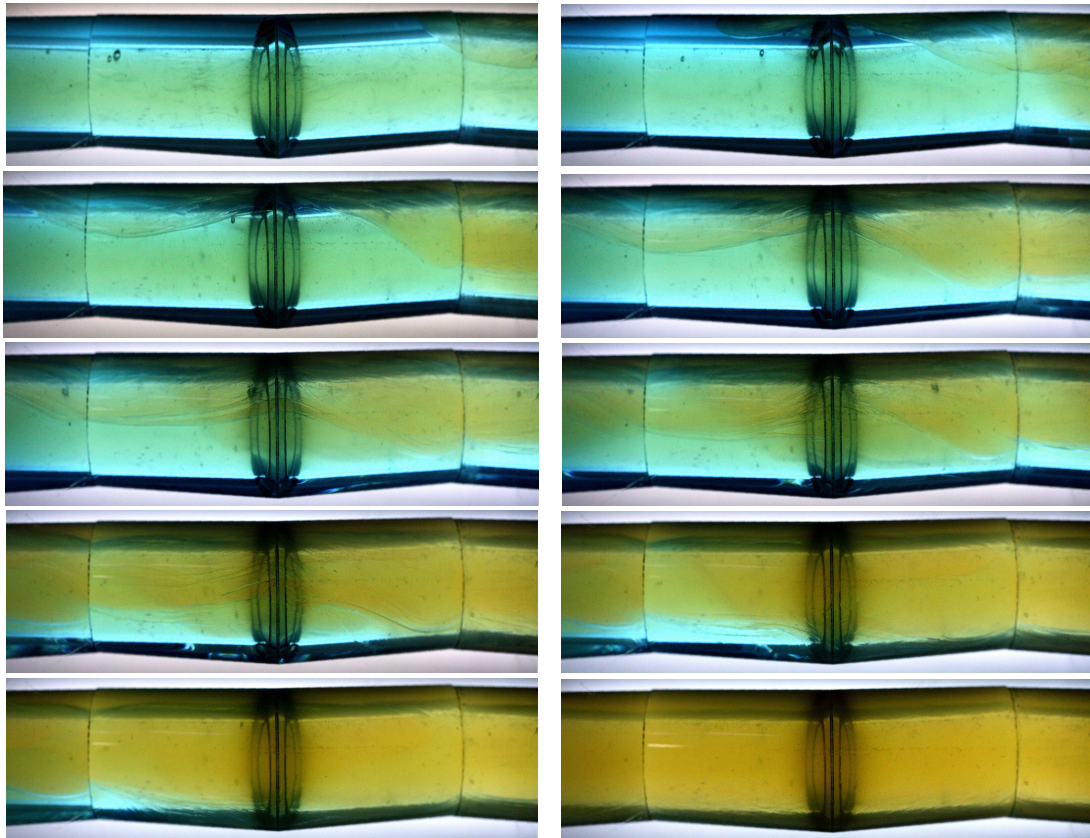


Figura 42 – Visualização Lateral do Caso 1

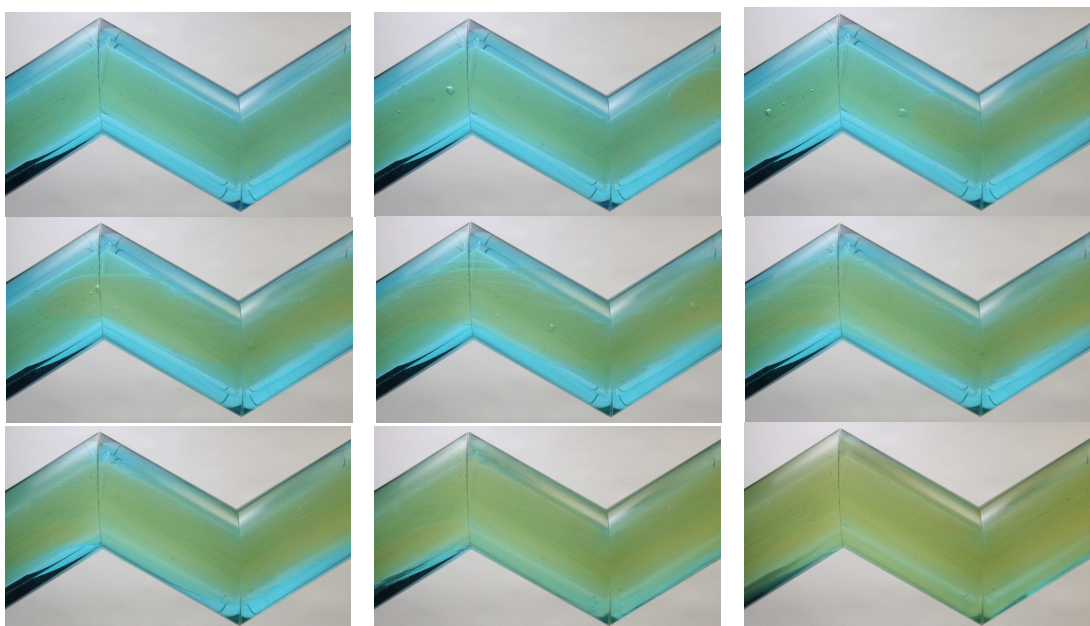


Figura 43 – Visualização Superior do Caso 1

A análise primeiro conjunto de fotografias nos permite observar uma clara penetração do líquido deslocado pelo líquido deslocador. O fenômeno, denominado “*viscous fingering*”, é característico do deslocamento de um fluido por outro menos viscoso, corroborando as previsões teóricas para uma razão de viscosidades tão menor que a unidade.

Além disso, percebemos que o “*finger*” viscoso segue pela parte superior do anular, para, apenas depois, se expandir radialmente. Essa tendência não pode ser atribuída a efeitos de empuxo, uma vez que a tabela 26 nos indica que o fluido deslocador é o mais denso. Sendo assim, supomos que tal fato está relacionado a uma possível excentricidade indesejada do tubo interno, que pode ter envergado sobre o próprio peso ou girado pela ação do tampão.

Notamos, também, que, mesmo passado um espaço de tempo considerável, ainda havia uma pequena película de fluido deslocado no fundo do tubo externo, demonstrando que o processo de remoção do mesmo não foi tão eficiente. A completa substituição entre as soluções, na área visualizada, ocorreu muito depois da passagem da frente da interface comum dos fluidos.

A segunda série de imagens ajuda a confirmar o surgimento da interpenetração mencionada anteriormente, possibilitando distinguir claramente a sua aparência em formato de um grande dedo. Ademais, percebemos claramente que o caminho preferencial se dá ao longo da superfície superior do tubo interno. As fotos superiores ressaltam ainda mais o processo de alargamento tardio do “*finger*” e presença uma camada de fluido não deslocado sobre as paredes do tubo externo, o que pode ser observado nos negativos a seguir.

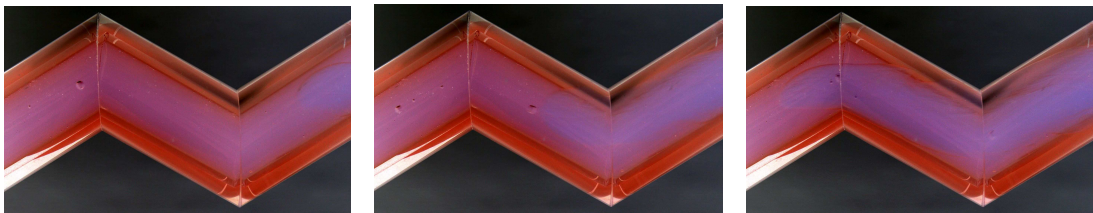


Figura 44 – “Viscous Fingering” no Caso 1

O aspecto do escoamento, passados cerca de 20 segundos do início do experimento, é visto nos negativos abaixo, que demonstram resquícios da solução de glicerina 84% junto às paredes da região anular:

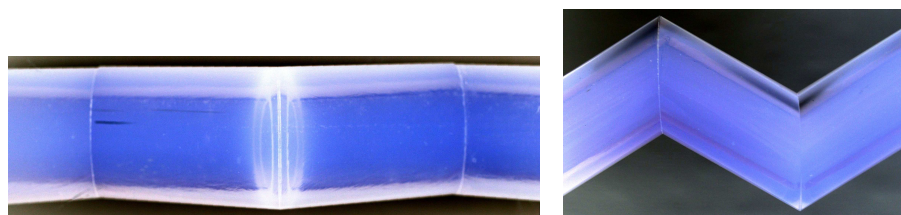


Figura 45 – Aspecto do Escoamento do Caso 1 Após 20 Segundos de Teste

### 5.2.2- Caso 2

O segundo caso estudado teve, como fluido deslocador, uma solução de mel 33% e, como fluido deslocado, uma solução de glicerina 49%. A razão de viscosidades e a razão de densidades observadas foram, respectivamente,  $\mu_1/\mu_2 = 0,50$  e  $\rho_1/\rho_2 = 1,00$ . A vazão volumétrica calculada foi  $Q \cong 0,000146m^3 / s$  e a completa substituição do fluido deslocado ocorreu em  $t \cong 30s$ . Abaixo, podem ser consultadas imagens da evolução de nossa simulação experimental, primeiramente a partir da câmera lateral e, em seguida, da câmera superior:

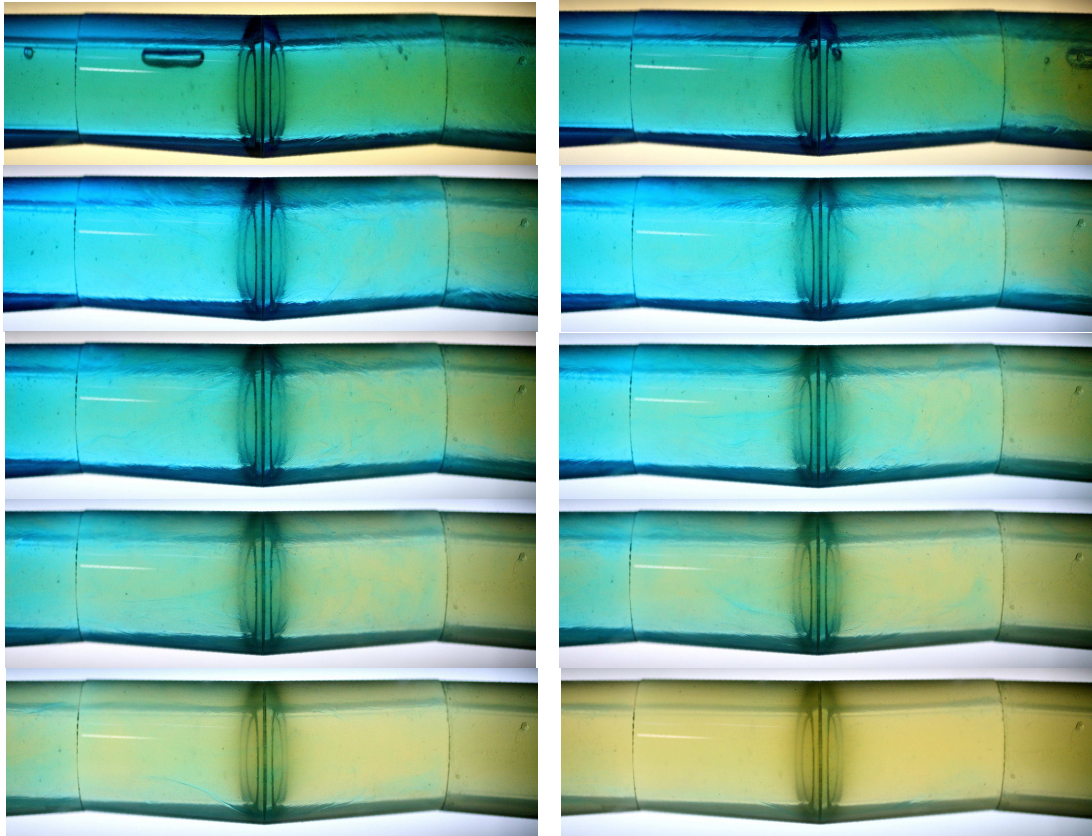


Figura 46 – Visualização Lateral do Caso 2

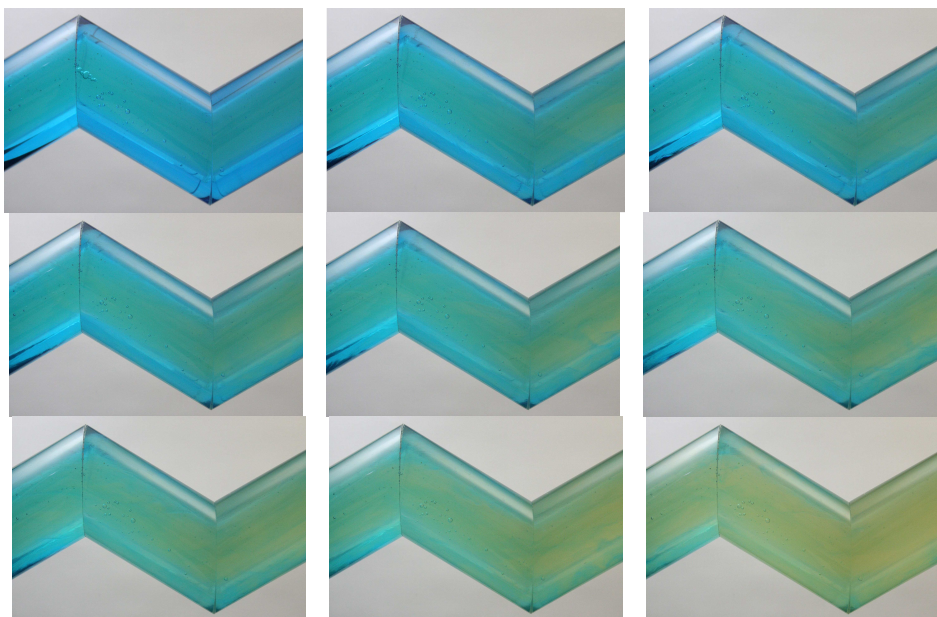


Figura 47 – Visualização Superior do Caso 2

A análise das imagens acima nos permite observar uma mistura do líquido deslocador com o deslocado, sem que possamos identificar claramente a interface entre ambos. Deve-se destacar que essa mistura não se refere a processos difusivos, mas sim, provavelmente, à elevação do número de Reynolds do escoamento, pela redução acentuada da viscosidade da solução de mel, em relação ao primeiro caso. A nítida presença de pequenas recirculações ao longo do anular fornece indícios adicionais de que podemos estar entrando em uma região de transição laminar-turbulento, apesar de todos os esforços feitos em contrário.

Mesmo assim, foi possível perceber que o deslocamento se deu de maneira mais uniforme, ainda que a maior parte do fluido não deslocado tenha se concentrado no fundo do tubo externo. Também constatamos que a remoção do líquido deslocado ocorreu em menos tempo do que no primeiro caso, demonstrando uma melhoria da performance da operação.

A visão superior do arranjo de tubos forneceu uma melhor perspectiva nesse experimento. Podemos distinguir, de maneira um pouco mais consistente, que, como no primeiro caso, existe um caminho preferencial de interpenetração do fluido deslocador sobre o deslocado por cima do tubo interno, seguido de uma expansão radial.

As fotografias em negativo expostas a seguir ressaltam o caráter irregular da fronteira entre os fluidos. Paralelamente, nota-se a presença de regiões com fluido não deslocado, especialmente nos cantos vivos da geometria.

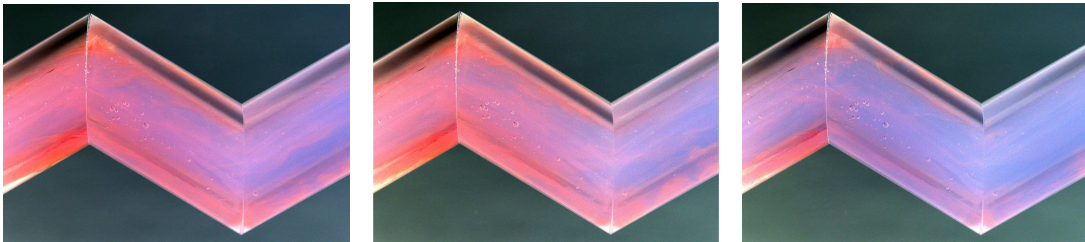


Figura 48 – Interface Instável no Caso 2

O aspecto do escoamento, decorridos 20 segundos de teste, era o seguinte:

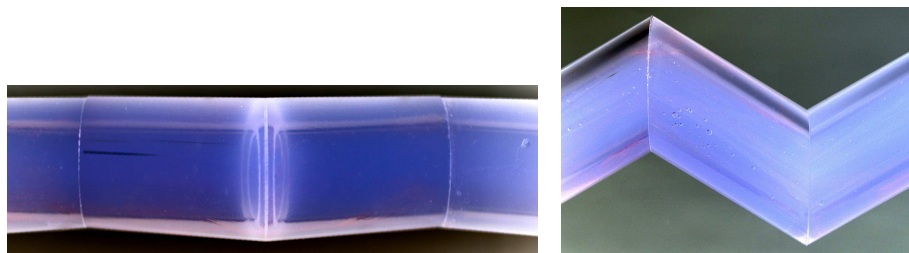


Figura 49 – Aspecto do Escoamento do Caso 2 Após 20 Segundos de Teste

### 5.2.3- Caso 3

O terceiro caso estudado teve, como fluido deslocador, uma solução de glicerina 49% e, como fluido deslocado, uma solução de mel 33%. A razão de viscosidades e a razão de densidades observadas foram, respectivamente,  $\mu_1/\mu_2 = 1,90$  e  $\rho_1/\rho_2 = 1,00$ . A vazão volumétrica calculada foi  $Q \cong 0,000123m^3 / s$  e a completa substituição do fluido deslocado ocorreu em  $t \cong 13s$ . Abaixo, podem ser consultadas imagens da evolução de nossa simulação experimental, primeiramente a partir da câmera lateral e, em seguida, da câmera superior:

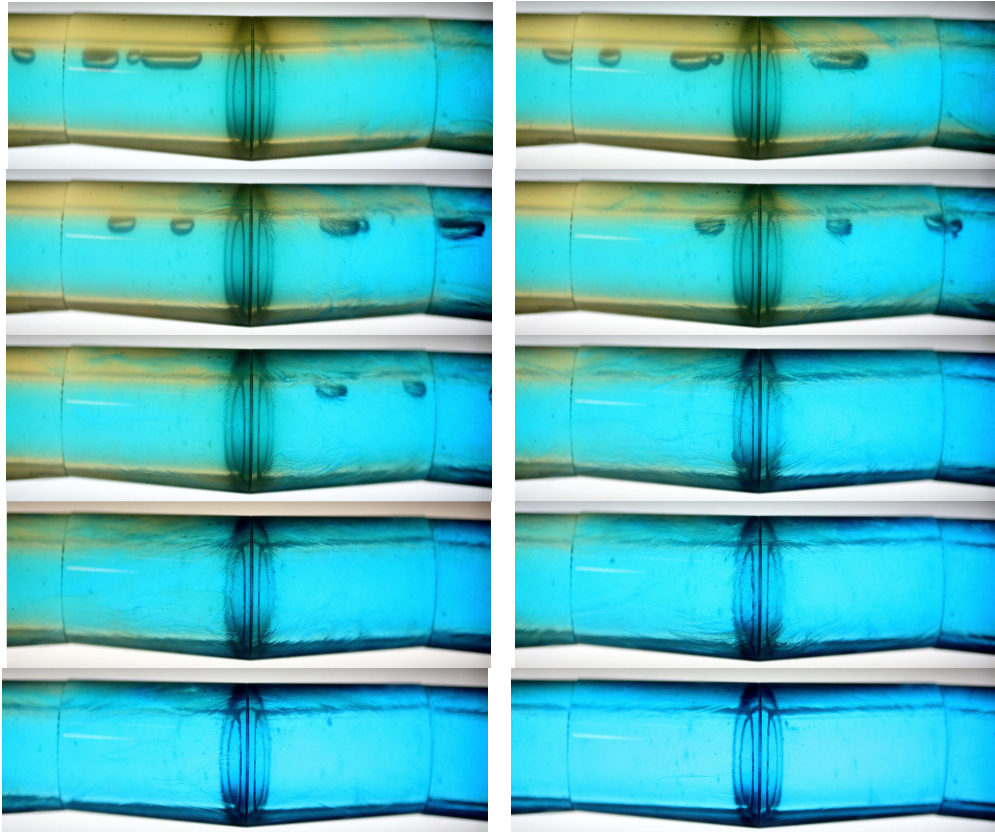


Figura 50 – Visualização Lateral do Caso 3

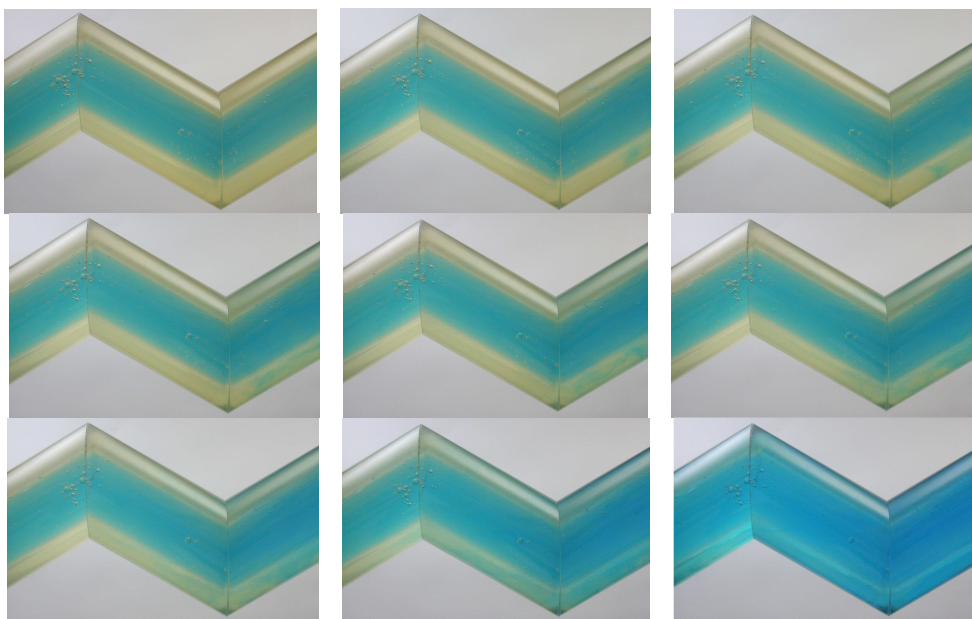


Figura 51 – Visualização Superior do Caso 3

As séries de fotos laterais mostram que, novamente, obtivemos uma interface instável entre os dois líquidos. Todavia, as interpenetrações devem ser confundidas com “*viscous fingers*”, já que, nesse caso, o fluido deslocador é mais viscoso. Mais uma vez, acreditamos que esse problema foi ocasionado pelo aumento da turbulência do escoamento, não traduzindo um fenômeno reológico relacionado à razão de viscosidades.

Por outro lado, nota-se perfeitamente que a fronteira dos fluidos tornou-se muito mais bem definida que aquela do deslocamento inverso. Ademais, percebemos que o tempo de substituição dos líquidos foi cerca de um terço do valor do segundo caso, além de não notarmos nenhum caminho preferencial seguido pela solução deslocadora. Tais fatos indicam um aumento na eficiência quando a razão de viscosidades é maior que a unidade.

A análise do segundo conjunto de imagens, que nos fornece a vista superior de nossa geometria experimental, demonstra que ocorreu realmente uma não esperada interpenetração de fluido deslocador. Essa constatação é evidenciada pela acentuação do perfil da interface na região anular, como vemos nos negativos abaixo:

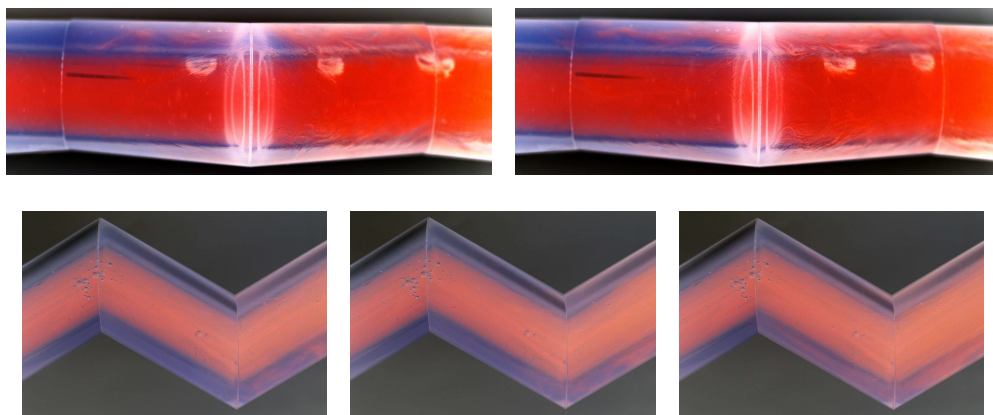


Figura 52 – Interpenetrações no Caso 3

As fotografias do escoamento após 20 segundos do início da simulação revelam que a remoção completa do fluido deslocado ocorreu antes desse instante:



Figura 53 – Aspecto do Escoamento do Caso 3 Após 20 Segundos de Teste

#### 5.2.4- Caso 4

O terceiro caso estudado teve, como fluido deslocador, uma solução de glicerina 49% e, como fluido deslocado, uma solução de mel 33%. A razão de viscosidades e a razão de densidades observadas foram, respectivamente,  $\mu_1/\mu_2 = 8,35$  e  $\rho_1/\rho_2 = 1,01$ . A vazão volumétrica calculada foi  $Q \cong 0,000123m^3 / s$  e a completa substituição do fluido deslocado ocorreu em  $t \cong 5s$ . Abaixo, podem ser consultadas imagens da evolução de nossa simulação experimental, primeiramente a partir da câmera lateral e, em seguida, da câmera superior:

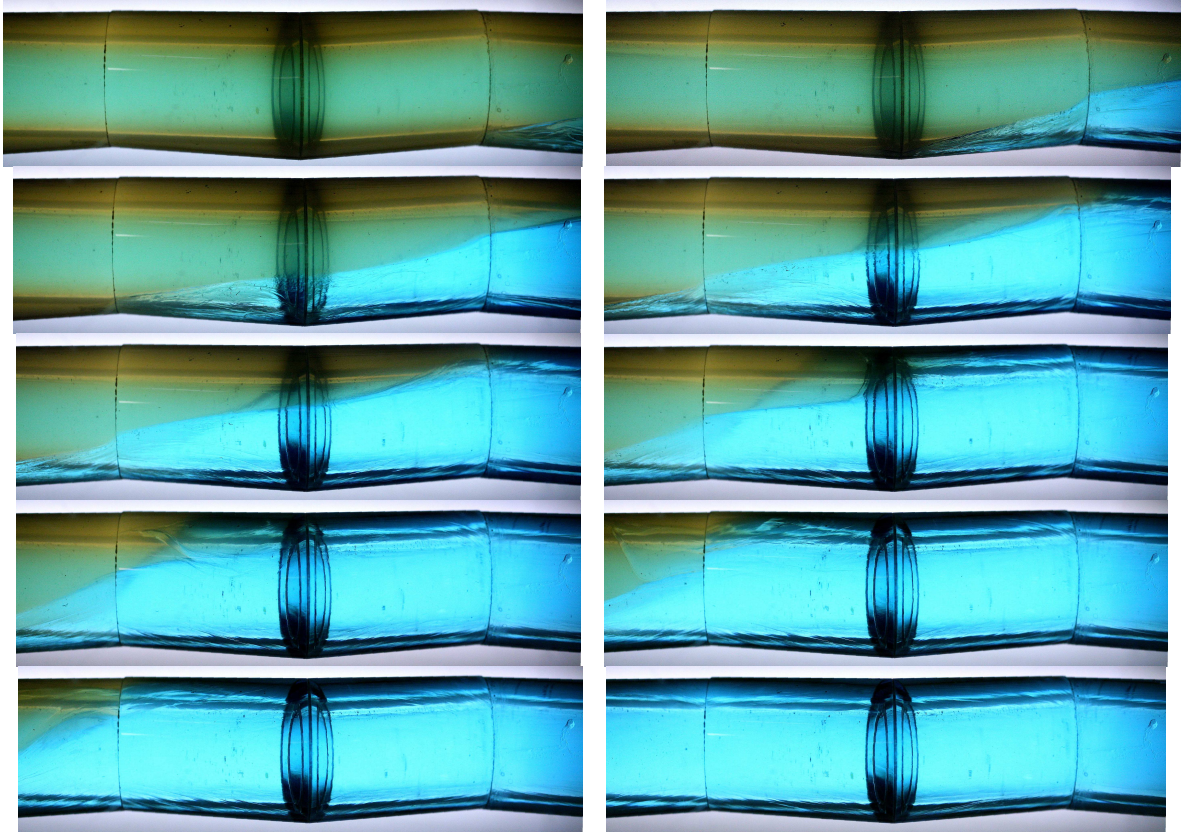


Figura 54 – Visualização Lateral do Caso 4

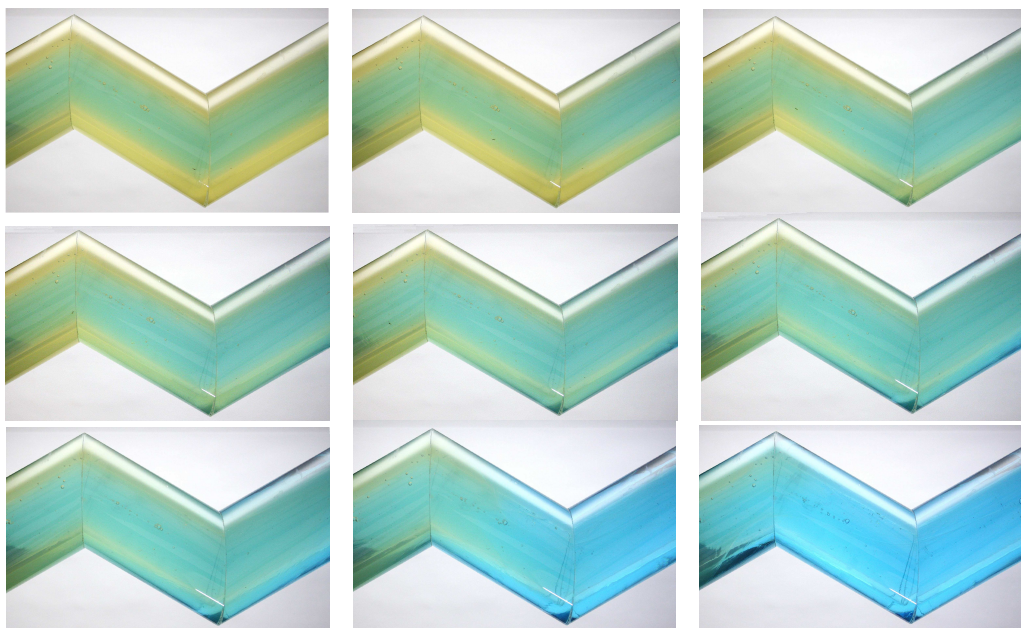


Figura 55 – Visualização Superior do Caso 4

As imagens laterais desse último caso indicam um deslocamento de alta eficiência entre os fluidos, evidenciado por uma fronteira plana que mantém seu formato praticamente constante ao longo do escoamento. Assim, apesar de inclinada, a interface entre os líquidos realizou um movimento de pistão, removendo de uma só vez a solução deslocada.

Essa inclinação pode ser explicada pela pequena diferença entre as massas específicas dos fluidos, já que o líquido deslocador é, de fato, mais denso que o deslocado. Outra possibilidade seria atribuir essa tendência à conformação da interface inicial, provavelmente pela abertura desigual da passagem do tubo interno para o externo, ou a uma eventual excentricidade não prevista do anular.

As imagens superiores do processo não fornecem informações adicionais interessantes, visto que a conformação da interface privilegia a parte inferior do tubo externo. Desse modo, apenas podemos confirmar a aparência estável da interface de deslocamento e a completa remoção do fluido deslocado.

Os negativos expostos a seguir têm o objetivo de ressaltar a fronteira entre o par de líquidos, evidenciando o movimento de pistão anteriormente mencionado:

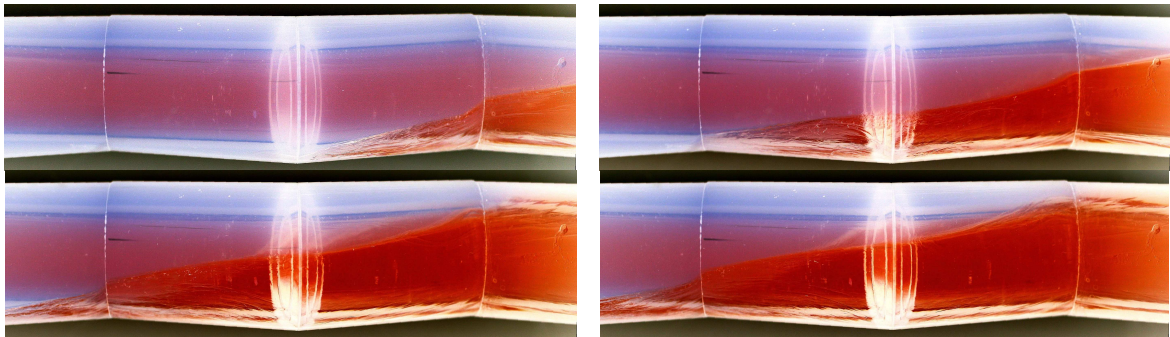


Figura 56 – Interface Plana no Caso 4

O reduzidíssimo tempo de substituição entre os fluidos permitiu que se verificasse uma ausência total de fluido deslocado nas imagens, após 20 segundos do início da simulação:

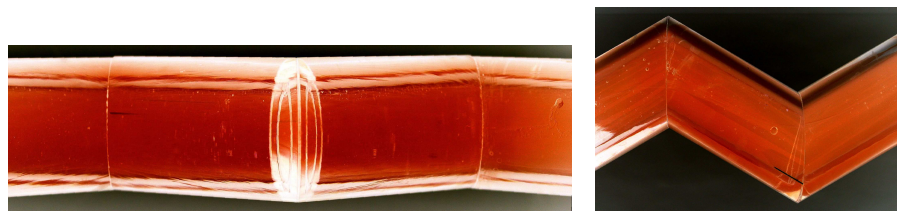


Figura 57 – Aspecto do Escoamento do Caso 4 Após 20 Segundos de Teste

### 5.3- Análise Comparativa

Após a realização de uma análise qualitativa caso a caso, percebemos, claramente, que, quanto maior é a razão de viscosidades, mais eficiente é o deslocamento de um fluido por outro. Todavia, fica difícil exprimir, por meio de uma comparação puramente visual, qual o verdadeiro impacto dos valores das razões de viscosidades sobre a performance dos procedimentos de substituição de fluidos.

Dessa maneira, propusemos uma metodologia que permitisse estimar uma relação quantitativa entre a grandeza de interesse de nosso trabalho e a capacidade de remoção do fluido deslocado. Os fundamentos dessa abordagem são discutidos nas próximas páginas.

Nosso método se baseia na idéia de que, na operação mais eficiente possível, o fluido deslocador atua como um pistão. Nesse caso, o tempo de deslocamento da interface comum dos líquidos através de um determinado comprimento é igual ao tempo de substituição completa de um fluido por outro, nesse mesmo comprimento. Portanto, se conseguirmos estimar essas duas variáveis para os escoamentos investigados, podemos obter um índice comparativo de eficiência entre as diversas razões de viscosidades.

Primeiramente, realizávamos, então, uma estimativa para a vazão volumétrica,  $Q$ , observada durante cada um dos escoamentos. Isso era feito através da medição da diferença entre o nível de fluido deslocador no respectivo reservatório de armazenagem,  $\Delta h_{res}$ , entre o início e o fim dos testes. Como estabelecêramos a duração dos experimentos em  $t_{exp} = 60s$  e conhecíamos a área do respectivo recipiente,  $A_{res}$ , tínhamos:

$$Q = \frac{A_{res} \cdot \Delta h_{res}}{t_{exp}} \quad (50)$$

A velocidade média do escoamento,  $\bar{u}$ , era, portanto, obtida da seguinte maneira:

$$\bar{u} = \frac{Q}{A_n} \quad (51)$$

Onde  $A_n$  é a área da seção anular.

Com o valor da vazão, calculávamos o tempo médio de deslocamento dos fluidos pelo comprimento de nossa área de visualização,  $t_v$ . Esse cálculo era realizado dividindo-se o respectivo volume da região de interesse,  $V_v$ , considerado igual ao da seção anular de 1,5 onda, pela vazão estimada:

$$t_v = \frac{V_v}{Q} (s) \quad (52)$$

Finalmente, chegávamos ao desejado índice de eficiência,  $I_\eta$ , simplesmente achando a razão entre o mencionado tempo médio de escoamento e o tempo necessário para a completa substituição de um volume de fluido igual a  $V_v$ ,  $t_s$ , obtido diretamente das visualizações experimentais:

$$I_\eta = \frac{t_v}{t_s} \quad (53)$$

A partir do valor da velocidade média estimada do fluxo, também era possível calcular o número de Reynolds crítico para cada teste realizado, isto é, o maior valor entre as duas soluções, e, dessa forma, investigar em qual regime realmente se encontravam nossos escoamentos. Esse foi o ponto de partida para fundamentarmos nossa suspeita sobre a desorganização da interface observada no segundo e no terceiro casos.

A seguir, é possível encontrar uma tabela que sintetiza todos os resultados gerados pela metodologia demonstrada acima:

	$\mu_1/\mu_2$	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$t_v$ (s)	$t_s$ (s)	$I_\eta$	Re
<b>Caso 1</b>	0,14	0,000175	2,5	53	4,7%	413
<b>Caso 2</b>	0,50	0,000146	3,0	30	9,9%	1003
<b>Caso 3</b>	1,90	0,000123	3,6	13	27,4%	828
<b>Caso 4</b>	8,35	0,000123	3,6	5	71,1%	312

Tabela 27 – Performance dos Processos de Substituição

Com base nesses dados, plotamos o seguinte gráfico da relação entre a razão de viscosidades e nosso índice de eficiência:

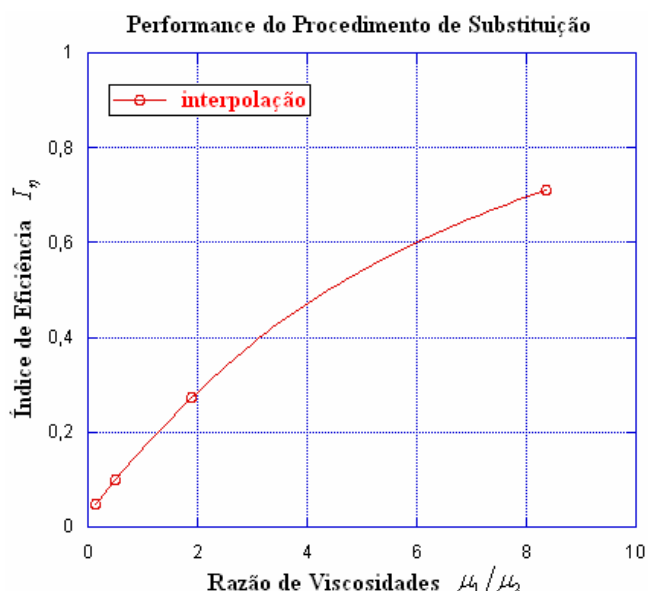


Figura 58 – Performance do Procedimento de Substituição de Fluidos

Cabe ressaltar que os valores calculados nessa seção são estimativas bem grosseiras dos parâmetros desejados e, por esse motivo, não devem ser tomados como expressão fiel de suas quantidades. O interesse aqui é apenas revelar a ordem de grandeza dessas variáveis, permitindo a criação de uma base de comparação, sem qualquer outra pretensão.

Verificando a tabela, vemos, portanto, que as informações são coerentes com a nossa análise qualitativa, indicando um aumento expressivo da performance do processo de substituição de fluidos com o aumento da razão de viscosidades. Ademais, a interpolação dos pontos do gráfico da figura 57 nos permite avaliar que esse aumento de eficiência apresenta um caráter assintótico.

Assim, podemos concluir que elevar a razão de viscosidades para valores muito grandes não resulta em um crescimento proporcional da eficácia da operação. Tal fato era esperado, já que, uma vez alcançada uma interface relativamente plana e estável, os ganhos de eficiência passam a ser cada vez menores, em se aumentando a viscosidade do fluido deslocador em

relação à do deslocado. Além disso, para outros parâmetros reológicos, se encontram comportamentos semelhantes na literatura.

Paralelamente, pelos dados da tabela 27, observamos que, realmente, os números de Reynolds dos casos 2 e 3 foram bem maiores que os outros. Apesar desses números indicarem que ambos os escoamentos ainda se encontram em regime laminar, devemos lembrar que a velocidade de escoamento foi obtida através de uma estimativa um tanto quanto rudimentar da vazão média experimental. Desse modo, corremos o risco de estarmos diante de uma transição para o regime turbulento, como suspeitado.

## 6- Considerações Finais

A análise de deslocamentos entre líquidos em espaços anulares é de suma importância para a compreensão e otimização do processo de cimentação primária de poços de petróleo. Até o presente momento, não se dispunha na literatura de um estudo experimental que contemplasse os efeitos de uma geometria irregular, característica desses poços, sobre esse procedimento.

Este trabalho teve, portanto, o intuito de investigar qualitativamente a eficiência da substituição entre dois líquidos em um anular, para diferentes razões de viscosidades, sem desprezar a influência das sinuosidades do poço. Para tanto, realizamos testes em uma planta experimental horizontal composta por tubos concêntricos em forma de uma série de ondas triangulares horizontais, de modo a reproduzir as irregularidades mencionadas.

Os líquidos utilizados em nossas simulações foram soluções aquosas de mel e glicerina, ambas newtonianas. Alterando as suas concentrações, definimos pares de fluidos deslocador-deslocado, com massas específicas similares, que apresentavam as seguintes razões de viscosidades:  $\mu_1/\mu_2 = 0,14$ ,  $\mu_1/\mu_2 = 0,50$ ,  $\mu_1/\mu_2 = 1,90$  e  $\mu_1/\mu_2 = 8,35$ .

A performance do deslocamento foi, então, avaliada pela visualização da evolução da interface e de eventuais resquícios de fluido não deslocado ao final do procedimento. Isso foi feito por meio de imagens fornecidas por duas câmeras fotográficas, uma delas posicionada acima de nossa bancada experimental e outra disposta lateralmente.

Para o primeiro caso, no qual a razão de viscosidades era  $\mu_1/\mu_2 = 0,14$ , observamos o fenômeno denominado “*viscous fingering*”, previsto pela teoria e caracterizado pela desestabilização da interface comum, que cresce pela interpenetração do fluido deslocador menos viscoso em formato de dedos. Verificamos que tal penetração ocorreu pela parte superior do anular, possivelmente devido a uma excentricidade indesejada, seguindo um caminho preferencial por cima do tubo interno, para apenas depois se expandir lateralmente. Além disso, as imagens mostram uma camada de líquido não deslocado sobre a parede do tubo externo, especialmente na parte de baixo, indicando que a substituição não foi muito eficiente.

O segundo caso, para o qual a razão de viscosidades era  $\mu_1/\mu_2 = 0,50$ , apresentou uma mistura não difusiva entre as duas soluções, impedindo a identificação clara da fronteira entre os líquidos. A aparição de pequenas recirculações levantou a suspeita de que tal problema se devia ao início de uma transição para o regime turbulento. Apesar da presença de resquícios de fluido não deslocado nos cantos vivos da geometria após a passagem da frente da interface, notamos que sua remoção ocorreu em menos tempo e de maneira mais uniforme do que no primeiro teste.

Para o terceiro caso, onde a razão de viscosidades era  $\mu_1/\mu_2 = 1,90$ , as séries de fotos apresentam, novamente, uma interface instável entre os dois líquidos. Todavia, as interpenetrações vistas não devem ser confundidas com “*viscous fingers*”, estando, provavelmente associadas a turbulências. Por outro lado, percebe-se perfeitamente que a fronteira dos fluidos tornou-se muito mais bem definida que aquela do deslocamento anterior.

Além disso, o tempo de substituição completa do volume observado foi cerca de um terço do valor do segundo caso e nenhum caminho preferencial foi seguido pela solução deslocadora.

No último caso, no qual a razão de viscosidades era  $\mu_1/\mu_2 = 8,35$ , ocorreu um deslocamento de alto desempenho entre os fluidos, evidenciado por uma fronteira plana que manteve seu formato praticamente constante ao longo do escoamento. Embora inclinada, a interface entre os líquidos realizou um movimento de pistão, removendo de uma só vez a solução deslocada. Tal inclinação pode ser atribuída tanto a efeitos de empuxo, quanto à má conformação da interface inicial ou a uma eventual excentricidade não prevista do anular.

Sendo assim, a visualização dos escoamentos nos permitiu confirmar um aumento expressivo da eficiência do processo de substituição de fluidos com o aumento da razão de viscosidades. Paralelamente, constatamos que a sinuosidade da região anular prejudica a remoção do fluido deslocado, na medida em que facilita o depósito deste nos cantos vivos existentes ao longo do caminho.

A metodologia proposta para obtermos uma base de comparação quantitativa entre os diversos casos analisados demonstrou, ainda, que esse aumento de eficiência apresenta um caráter assintótico. Dessa maneira, concluímos que elevar a razão de viscosidades para valores muito grandes não resulta em um crescimento proporcional da eficácia da operação, já que, uma vez alcançada uma interface relativamente plana e estável, os ganhos passam a ser cada vez menores.

Adicionalmente, a estimação da velocidade média dos escoamentos, possibilitou-nos afirmar que os números de Reynolds dos casos 2 e 3 foram bem maiores que os outros. Assim, acreditamos, realmente, que a desestabilização da interface verificada nos dois casos pode estar relacionada não à razão de viscosidades, mas sim a uma transição para o regime turbulento.

Após a realização de nossos experimentos e uma reflexão sobre os problemas enfrentados, surgiram algumas considerações relevantes sobre melhorias a serem implementadas. Primeiramente, notamos a necessidade de se alterar o projeto de construção e montagem do arranjo de tubos, de forma a diminuir a fragilidade e garantir a perfeita vedação das juntas de cada seção das ondas triangulares. Além disso, deve-se estudar um modo de se evitar o envergamento do tubo interno, assim como sua rotação pelo tampão, quando ambos estão em contato, a fim de impedir uma indesejada excentricidade do anular.

Ademais, para aperfeiçoar nossa análise quantitativa, propomos um controle mais preciso da vazão de bombeamento, como, por exemplo, através da injeção de fluido não pela pressurização dos reservatórios de armazenagem, mas sim por meio de uma bomba. Para tanto, sugerimos a aquisição de um módulo de bombeamento **Waters 515**, que permite o controle do fluxo imposto de  $0,001\text{ml}/\text{min}$  a  $10000\text{ml}/\text{min}$ , com precisão de  $\pm 0,1\%$ , em uma faixa de operação de pressão até  $600\text{psi}$ .

Com relação à caracterização dos fluidos, aconselhamos a utilização de uma nova geometria no reômetro, preferencialmente ranhurada, como, por exemplo, a “*grooved couette*”, desenvolvida pelo Grupo de Reologia da PUC-Rio. Talvez assim possamos minimizar os erros de medição verificados em baixas taxas de cisalhamento, aumentando a confiabilidade de nossos resultados.

Nosso sistema de visualização também merece ser modificado. Em um primeiro momento, imaginamos o uso de filmadoras digitais, ao invés de máquinas fotográficas. Mais no futuro, pode-se pensar na utilização de planos de laser e partículas traçadoras no fluido deslocado, o que envolverá enormes esforços no sentido de se eliminar reflexos e outros inconvenientes de uma geometria não retilínea.

Devemos lembrar, ainda, que a eficiência do processo de remoção de um fluido por outro não é unicamente função da razão de viscosidades, mas sim de um variado conjunto de fatores. Dessa forma, propomos o estudo, em nossa bancada experimental, da influência de

outros parâmetros importantes indicados na literatura, em especial, a vazão de bombeamento e a razão de densidades.

Finalmente, devido à versatilidade de nossa planta experimental, sugerimos, também, a repetição dos experimentos aqui realizados e dos outros propostos com a ondulação colocada no plano vertical, tanto para fluidos newtonianos quanto para fluidos não newtonianos. Isso nos permitiria traçar um paralelo entre a performance da operação em uma ampla gama de situações, se aproximando gradualmente da complexidade das operações de campo, contribuindo enormemente para a evolução do conhecimento e domínio do processo de cimentação primária dos poços de petróleo.

### Referências Bibliográficas

- [1] ALLOUCHE, M.; FRIGAARD, I.; SONA, G. **Static Wall Layers in the Displacement of Two Visco-Plastic Fluids in a Plane Channel**. Journal of Fluid Mechanics, p. 243-277, 2000.
- [2] AMAR, M.B.; POIRÉ, E.C. **Pushing a Non-Newtonian Fluid in a Hele-Shaw Cell: From fingers to Needles**. Physics of Fluids 11, p. 1757-1767, 1999.
- [3] BAKER, R. **A Primer of Oilwell Drilling**. Sixth Edition, Petroleum Extension Service, 2001.
- [4] BAKHTIYAROV, S.; SIGINER, D.A. **Fluid Displacement in a Horizontal Tube**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 65, p. 1-15, 1996.
- [5] BEIRUTE, R.M.; FLUMERFELT, R.W. **Mechanics of the Displacement Process of Drilling Muds by Cement Slurries Using an Accurate Rheological Model**. Society of Petroleum Engineers, (6801), 1977.
- [6] BERRY, S. **Optimization of Synthetic-Based and Oil-Based Mud Displacements with an Emulsion-Based Displacement Spacer System**. Society of Petroleum Engineering, (95273), 2005.
- [7] BIEZEN, E.; VAN DER WERFF, N.; RAVI, K. **Experimental and Numerical Study of Drilling Fluid Removal from a Horizontal Wellbore**. Society of Petroleum Engineering, (62887), 2000.
- [8] BIRD, R.B.; ARMSTRONG, R.C.; HASSAGER, O. **Dynamics of Polymeric Liquids**. Second Edition, New York, John Wiley & Sons, 1987.
- [9] BITTLESTON, S.H.; FERGUSON, J.; FRIGAARD, I.A. **Mud Removal and Cement Placement During Primary Cementing of an Oil Well - Laminar non-Newtonian Displacements in an Eccentric Annular Hele-Shaw Cell**. Journal of Engineering Mathematics, v. 43, p. 229-253, 2002.
- [10] BOURGOYNEJR, A.T.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E.; YOUNGJR, F.S. **Applied Drilling Engineering**. Second Volume, SPE Textbook Series, 1991.
- [11] BRAND, F.; PEIXINHO, J.; NOUAR, C. **A Quantitative Investigation of the Laminar-Turbulent Transition: Application to Efficient Mud Cleaning**. Society of Petroleum Engineers, (71375), 2001.
- [12] BRETHERTON, F. P. **The Motion of Long Bubbles in Tubes**. Journal of Fluids Mechanics, v. 10, p. 166-188, 1960.
- [13] BRICE, J.W.JR.; HOLMES, B.C. **Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques**. Journal of Petroleum Technology, v. 16, n. 5, p. 503-508, 1964.
- [14] CARNEY, L.L. **Cement Spacer Fluid**. Society of Petroleum Engineers, (4784), 1974.
- [15] CARRASCO-TEJA, M.; FRIGAARD, I.A.; SEYMOUR, B.R.; STOREY, S. **Viscoplastic Fluid Displacements in Horizontal Narrow Eccentric Annuli: Stratification and Travelling Wave Solutions**. Journal of Fluid Mechanics, v. 605, p. 293-327, 2008.

- [16] CELNIK, J. **Deslocamento de Líquidos em Espaços Anulares**. Rio de Janeiro, 2008. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- [17] CHEN, C.; MEIBURG, E. **Miscible Displacements in Capillary Tubes. Part 2: Numerical Simulation**. Journal of Fluid Mechanics, v. 326, p. 57-90.
- [18] CHEVALIER, C.; AMAR, M.B.; BONN, D.; LINDNER, A. **Inertial Effects on Saffman-Taylor Viscous Fingering**. Journal of Fluid Mechanics, v. 552, p. 83-97, 2006.
- [19] CLARK, C.R.; CARTER, L.C. **Mud Displacement with Cement Slurries**. Journal of Petroleum Technology, v. 25, n. 7, p. 775-783, 1973.
- [20] COUTURIER, M.; GUILLOT, D.; HENDRIKS, H.; CALLET, F. **Design Rules and Associated Spacer Properties for Optimal Mud Removal in Eccentric Annuli**. Society of Petroleum Engineering, (21594), 1990.
- [21] COX, B.G. **On Driving a Viscous Fluid Out of a Tube**. Journal of Fluid Mechanics, v. 14, p. 81-96, 1962.
- [22] COX, B.G. **An Experimental Investigation of the Stream Lines in Viscous Fluid Expelled from a Tube**. Journal of Fluid Mechanics, v. 20, p. 193-200, 1964.
- [23] DE SOUZA MENDES, P.R.; DUTRA, E.S. **Viscosity Function for Yield-Stress Liquids**. Applied Rheology, v. 14, p. 296-302, 2004.
- [24] DE SOUZA MENDES, P.R. **Dimensionless Non-Newtonian Fluid Mechanics**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 147, p. 109-116, 2007.
- [25] DE SOUZA MENDES, P.R.; DUTRA, E.S.; SIFFERT, J.R.; NACCACHE, M.F. **Gas Displacement of Viscoplastic Liquids in Capillary Tubes**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 145, p. 30-40, 2007.
- [26] DEBBAUT, B.; CROCHET, M.J. **Extensional Effects in Complex Flows**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 30, p. 169-184, 1988.
- [27] DIMAKOPOULOS, Y.; TSAMOPOULOS, J. **Transient Displacement of Newtonian and Viscoplastic Liquids by Air in Complex Tubes**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 142, p. 162-182, 2007.
- [28] DUTRA, E.S.; MARTINS, A.; MIRANDA, C.R.; ARAGÃO, A.; CAMPOS, G.; DE SOUZA MENDES, P.R.; NACCACHE, M.F. **Dynamics of Fluid Substitution While Drilling and Completing Long Horizontal-Section Wells**. Society of Petroleum Engineering, (94623), 2005.
- [29] DUTRA, E.S.S. **Deslocamento de Líquidos Não Newtonianos em Tubos Anulares Excêntricos**. Rio de Janeiro, 2005. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- [30] FAIRBROTHER, F.; STUBBS, A.E. **Studies in Electro-Endosmosis - Part IV - The Bubble-Tube Method of Measurements**. Journal of Chemical Society, v. 1, p. 527-529, 1935.
- [31] FOX, R.W.; MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Sexta Edição, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 2006.
- [32] FRIGAARD, I.A.; ALLOUCHE, M.; GABARD, C. **Setting Rheological Targets for Chemical Solutions in Mud Removal and Cement Design**. Society of Petroleum Engineers, (64998), 2001.
- [33] FRIGAARD, I.A.; PELIPENKO, S. **Effective and Ineffective Strategies for Mud Removal and Cement Slurry Design**. Society of Petroleum Engineers, (80999), 2003.
- [34] GABARD, C.; HULIN, J.P. **Miscible Displacement of Non-Newtonian Fluids in a Vertical Tube**. The European Physical Journal E, p. 231-241, 2003.
- [35] GATLIN, C. **Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1960.
- [36] GOLDSMITH, H.L.; MASON, S.G. **The Flow of Suspension Through Tubes ii. Single Large Bubbles**. Journal of Colloid Science, p. 237-261, 1963.

- [37] GRAVES, W.G.; COLLINS, R.E. **Non-Newtonian Fluid Displacement in an Irregular Annulus of Axial Symmetry**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 8, p. 43-58, 1981.
- [38] GUILLOT, D.; DESROCHES, J.; FRIGAARD, I.A. **Are Preflushes Really Contributing to Mud Displacement During Primary Cementing?** Society of Petroleum Engineering, (105903), 2007.
- [39] HAUT, R.C. **Applications of a Computer Simulator to Primary Cementing**. Society of Petroleum Engineers, (7588), 1978.
- [40] HAUT, R.C.; CROOK, R.J. **Primary Cementing: The Mud Displacement Process**. Society of Petroleum Engineers, (8253), 1979.
- [41] HAUT, R.C.; CROOK, R.J. **Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids**. Society of Petroleum Engineers, p. 1828-1834, 1981.
- [42] JAKOBSEN, J.; STERRI, N.; SAASEN, A.; AAS, B.; KJOSNES, I.; VIGEN, A. **Displacements in Eccentric Annuli During Primary Cementing in Deviated Wells**. Society of Petroleum Engineers, (21686), 1991.
- [43] JTP ONLINE. **Frontiers of Technology – Horizontal and Multilateral Wells**. Journal of Petroleum Technology, v. 7, 1999.
- [44] KELESSIDIS, V.C.; GUILLOT, D.J.; RAFFERTY, R.; BORRIELL, G.; MERLO, A. **Field Data Demonstrate Improved Mud Removal Techniques Led to Successful Cement Jobs**. Society of Petroleum Engineers, (26982), 1995.
- [45] KROKEN, W.; SJAHOLM, A.J.; OLSEN, A.S. **Tide Flow: A low Rate Density Driven Cementing Technique for Highly Deviated Wells**. Society of Petroleum Engineering, (35082), 1996.
- [46] LINDNER, A.; BONN, D.; MEUNIER, J. **Viscous Fingering in a Shear-Thinning Fluid**. Physics of Fluids, v. 12, P. 256-261, 2000.
- [47] LINDNER, A.; COUSSOT, P.; BONN, D. **Viscous Fingering in a Yield Stress Fluid**. Physical Review Letters, v. 85, p. 314-317, 2000.
- [48] LOCKYEAR, C.F.; HIBBERT, A.P. **Integrated Primary Cementing Study Defines Key Factors for Field Success**. Society of Petroleum Engineers, 1989.
- [49] LOCKYEAR, C.F.; RYAN, D.F.; GUNNINGHAM, M.M. **Cement Channeling: How to Predict and Prevent**. SPE Drilling Engineering, v.5, n. 3, p. 201-208, 1990.
- [50] LUO, Y.; PEDEN, J.M. **Flow of Drilling Fluids Through Eccentric Annuli**. Society of Petroleum Engineers, (16692), 1987.
- [51] MCPHERSON, S.A. **Cementation of Horizontal Wellbores**. Society of Petroleum Engineering, (62893), 2000.
- [52] MARTIN, M.; LATIL, M.; VETTER, P. **Mud Displacement by Slurry During Primary Cementing Jobs: Predicting Optimum Conditions**. Society of Petroleum Engineers, (7590), 1978.
- [53] MOORE, P.L. **Drilling Practices Manual**. The Petroleum Publishing Co., 1974.
- [54] MOYERS-GONZÁLEZ, M.A.; FRIGAARD, I.A.; SCHERZER, O.; TSAI, T.P. **Transient Effects in Oilfield Cementing Flows: Qualitative Behaviour**. European Journal of Applied Mathematics, v. 18, p. 477-512, 2007.
- [55] MUKHALALATY, T.; SUWAIDI, A.A.; SHAHEEN, M. **Increasing Well Life Cycle by Eliminating the Multistage Cementer and Utilizing a Light Weight High Performance Slurry**. Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [56] OLBRICHT, W.L.; KUNG, D.M. **The Deformation and Breakup of Liquid Drops in Low Reynolds Number Flow Through a Capillary**. Physics of Fluids, p. 1347-1354, 1992.
- [57] PLÁCIDO, J.C.R. **Cimentação de Poços de Petróleo**. Notas de Aula de Perfuração (MEC2015), 2005.2.

- [58] PETITJEANS, P.; MAXWORTHY, T. **Miscible Displacements in Capillary Tubes - Part 1: Experiments**. Journal of Fluid Mechanics, v. 326, p. 37-56, 1996.
- [59] ROCHA, L.A.S.; AZUAGA, D.; ANDRADE, R. **Perfuração Direcional**. Interciência, 2ª Edição, p. 276, 2006.
- [60] SAUER, C.W. **Mud Displacement During Cementing: A State of the Art**. Society of Petroleum Engineers, (14197), 1987.
- [61] SAVINO, J. **Deslocamento de Fluidos em Poços Horizontais Não Retilíneos**. Rio de Janeiro, 2009. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- [62] SCHLEIZER, A.D.; BONNECAZE, R.T.. **Displacement of a Two-Dimensional Immiscible Droplet Adhering to a Wall in Shear and Pressure-Driven Flows**. Journal of Fluid Mechanics, v. 383, p. 29-54, 1999.
- [63] SILVA, M.G.P.; MARTINS, A.L.; OLIVEIRA, A.A.J. **Avaliação do Comportamento Reológico de Fluidos de Perfuração no Escoamento Anular**. Seminário de Fluidos de Perfuração, p. 3-18, 1989.
- [64] SOARES, E.J. **Deslocamento de Fluidos Imiscíveis em Tubos: Efeito de Capilaridade, Inércia, Razão de Viscosidades e Propriedades Reológicas**. Rio de Janeiro, 2002. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- [65] SOARES, E.J.; CARVALHO, M.S.; DE SOUZA MENDES, P.R. **Immiscible Liquid-Liquid Displacement in Capillary Tubes**. Journal of Fluids Engineering, p. 24-31, 2005.
- [66] SZABO, P.; HASSAGER, O. **Displacement of One Newtonian Fluid by Another: Density Effects in Axial Annular Flow**. J. Multiphase Flow, p. 113-129, 1997.
- [67] TAYLOR, G.I. **Deposition of a Viscous Fluid on the Wall of a Tube**. Journal of Fluids Mechanics, v. 10, p. 161-165, 1960.
- [68] TAYLOR, G.I. **The Motion of Long Bubbles in Tubes**. Journal of Fluids Mechanics, v. 10, p. 161-165, 1960.
- [69] TEHRANI, A.; FERGUSON, J.; BITTLESTON, S.H. **Laminar Displacement in Annuli: A Combined Experimental and Theoretical Study**. Society of Petroleum Engineers, (24569), 1992.
- [70] THÉRON, B.E.; BODIN, D.; FLEMING, J. **Optimization of Spacer Rheology Using Neural Network Technology**. Society of Petroleum Engineering, (74498), 2002.
- [71] THOMPSON, R.; DE SOUZA MENDES, P.R.; NACCACHE, M.F. **A New Constitutive Equation and its Performance in Contraction Flows**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 86, p. 375-388, 1999.
- [72] TRIGGIA, A.A.; CORREIA, C.A.; FILHO, C.V.; OUTROS. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Interciência, 2001.
- [73] VARGES, P.R.; FARIAS, P.S.C. **Estabilidade de Interface entre Líquidos Não Newtonianos Escoando em Meio Poroso**. Rio de Janeiro, 2007. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- [74] YAMAMOTO, T.; KAMIKAWA, H.; TANAKA, H.; NAKAMURA, K.; MORI, N. **Viscous Fingering of Non-Newtonian Fluids in a Rectangular Hele-Shaw Cell**. Journal of the Society of Rheology, v. 29, p. 81-87, 2001.
- [75] YAMAMOTO, T.; KIMOTO, R.; MORI, N. **Tip Velocity of Viscous Fingers in Shear-thinning Fluids in a Hele-Shaw Cell**. JSME International Journal, v. 4, p. 756-762, 2005.
- [76] YAMAMOTO, T. **Numerical and Experimental Analyses of Unsteady Viscoelastic Flow in Complex Flow Field**. Journal of the Society of Rheology, v. 34, p. 283-289, 2006.

- [77] YAMAMOTO, T.; KAMIKAWA, H.; MORI, N.; NAKAMURA, K. **Numerical Simulation of Viscous Fingering in Non-Newtonian Fluids in a Hele-Shaw Cell.** Journal of the Society of Rheology, v. 30, p. 121-127, 2002.
- [78] <http://www2.petrobras.com.br/EspacoConhecer/Produtos/DerivadosdoPetroleo.asp>, **Acessado em 15 de Junho de 2009.**
- [79] <http://www.onip.org.br>, **Acessado em 30 de junho de 2009.**