

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Óleos pesados junto aos betumes formam uma parte considerável das reservas mundiais. Hoje em dia, calcula-se que os óleos pesados correspondem quase ao dobro da reserva da parcela de óleo convencional. Desta forma fica claro que esta fonte de hidrocarboneto tem um papel importante nas matrizes energéticas de vários países.

Os óleos pesados são caracterizados pela alta viscosidade (10000 cp)[3]. Esta alta viscosidade torna a produção e transporte de óleos pesados muito complexa e custosa, dificultando o seu aproveitamento.

Diferentes técnicas são testadas como o objetivo de reduzir a perda de carga do escoamento e conseqüentemente o custo de transporte de óleos pesados.

Algumas técnicas para o bombeio de óleos pesados utilizam adição de certa quantidade de óleo leve, reduzindo assim a viscosidade da mistura e conseqüentemente o atrito produzido pelas forças viscosas. Este método requer a existência de uma fonte de óleo leve nas proximidades da reserva. Além da disponibilidade, o óleo leve deve ter uma boa compatibilidade com o óleo pesado, para assegurar uma mistura uniforme [4].

Outro método utilizado é a injeção de vapor. Este método de recuperação suplementar é utilizado amplamente em reservatórios fraturados. Reservatórios possuidores de óleo pesado são os que melhor respondem ao aquecimento mediante vapor. Neste método o isolamento térmico dos poços é necessário levando a um aumento do custo de produção. Este método é muito comum em poços de águas profundas já que as temperaturas a 3000 m de profundidade podem chegar ate 4<sup>o</sup>C aumentando a viscosidade consideravelmente [5].

Outras alternativas para o transporte de óleos pesados consideram a tecnologia Core-Annular Flow, que consiste em bombear um liquido de baixa viscosidade adjacente a parede e o óleo viscoso no centro do tubo. O fluido de baixa viscosidade age como um lubrificante, reduzindo consideravelmente a

força de atrito na parede. Esta tecnologia pode reduzir em até 1000 vezes as quedas de pressão por atrito nas paredes [6], mas apresenta muitas limitações e problemas que podem prejudicar o processo e inviabilizar a sua utilização

Neste trabalho, uma alternativa ao core-annular flow é analisada. A ideia é também lubrificar a parede com um fluido de baixa viscosidade. Porém, para contornar os problemas de estabilidade da interface entre os líquidos e perda de lubrificação das paredes após longas paradas, o líquido lubrificante é mantido alojado em pequenas ranhuras existentes nas paredes.

## 1.2 Core-annular flow (CAF)

Como foi discutido anteriormente um dos métodos para reduzir a perda de carga do escoamento de óleos pesados é o chamado “*Core Annular Flow*”. O processo é caracterizado pelo escoamento de líquidos imiscíveis de forma que o líquido de menor viscosidade escoe próximo da parede e óleo viscoso na parte central, como é representando na figura 1.1.

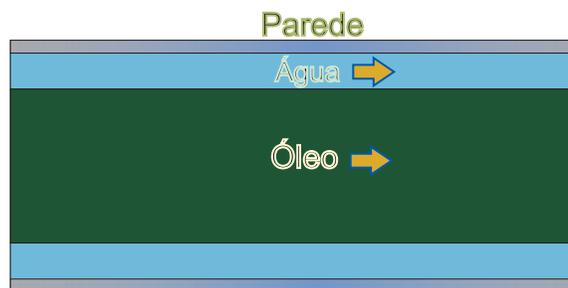


Figura 1.1: Core Annular Flow Process

Muitos pesquisadores na área consideram este processo como uma das mais promissórias alternativas para o escoamento de óleos pesados, já que com este método a queda de pressão é próxima a perda de pressão no escoamento monofásico do líquido menos viscoso.

Porém este método tem que superar uma série de desafios tecnológicos e econômicos antes de ser economicamente viável e aplicado em diferentes situações

Para o funcionamento deste método, deve-se garantir sempre a existência de um filme de líquido menos viscoso, normalmente água, junto a parede da tubulação. Se este filme é rompido e o óleo entra em contato com a parede do duto, o efeito lubrificante da água é perdido. A garantia da existência do filme de água para diferentes condições de operação e durante paradas de escoamento representa o maior desafio tecnológico do método.

Para evitar o contato do óleo com a parede do tubo Silva (2003) [7] mostrou-se eficiente controle de molhabilidade da parede. Desta forma no uso de core-annular flow, é importante que a parede do tubo seja hidrofílica e oleofóbica.

Outro grande desafio e limitação do transporte de óleos pesados usando core-annular flow é a garantia deste regime após longas paradas do escoamento. Devido a diferença de densidades, os líquidos vão ter a tendência de estratificação, colocando o óleo viscoso em contato com a parede do tubo. O re-estabelecimento do regime core-annular flow é bastante difícil nestes casos.

Alguns testes feitos por [1] mostram que o escoamento óleo-água em regime de core-annular flow só é estável para um determinado conjunto de condições operacionais e propriedades dos líquidos. A figura 1.2 apresenta fotos de configurações estáveis. Se o escoamento for instável, perturbações da interface entre as fases crescem sem limites até a mesma atingir a parede do tubo.

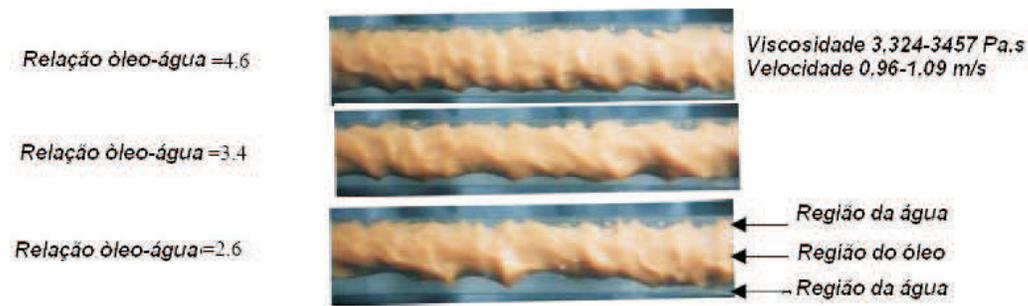


Figura 1.2: Estabilidade bifásica num escoamento CAF [1]

A estabilidade do fluxo bifásico em regime de core-annular flow deve ser garantida para diferentes geometrias como joelhos, válvulas e outros acidentes hidráulicos comuns no transporte dutoviário.

### 1.3

#### Adição de polímeros

A redução de atrito hidrodinâmico pela adição de polímeros é também amplamente estudada. Porém, este método só apresenta resultados em escoamentos turbulentos. Testes no transporte de óleo no Alasca mostram que a adição de redutores de atrito, permitiu uma economia de energia em torno de 20%[8].

Quantidades pequenas de polímeros (sintéticos ou biopolímeros) de alto peso molecular (50000 kg/mol ou mais) são dissolvidos, provocando uma

mudança na estrutura da turbulência e assim provocando uma redução de atrito. Alguns experimentos feitos mostram que esta mudança de estrutura ocorre em soluções da ordem de 50 a 200 partes por milhão [9].

Um problema da adição de polímeros é que a ação mecânica (taxa de deformação) sobre a cadeia polimérica pode causar a degradação da mesma, diminuindo a massa molecular do polímero e, conseqüentemente, diminuindo a eficácia da redução de atrito [10].

Vale ressaltar que para óleos com viscosidade muito alta, o escoamento normalmente ocorre em regime laminar, tornando inviável a utilização de polímeros

#### 1.4 Micro ranhuras

O uso de parede com micro e nano cavidades com o objetivo de reduzir o arraste viscoso na parede já foi testado, principalmente no escoamento de água sobre uma superfície sólida. Neste caso, as cavidades ficam preenchidas com ar, já que as pequenas dimensões das cavidades e a tensão superficial da água não permitem a invasão das cavidades [11]. A figura 1.3 apresenta uma representação esquemática da configuração da interface entre as duas fases. O atrito viscoso sobre a cavidade é bem pequeno, já que a água não entra em contato com a superfície sólida da parede interior da cavidade.

Trabalhos já feitos com este tipo de superfícies mostram que as reduções de atrito podem variar desde 60% para superfícies com micropostes, e de até 99% para uma superfície que apresenta nanopostes [11]

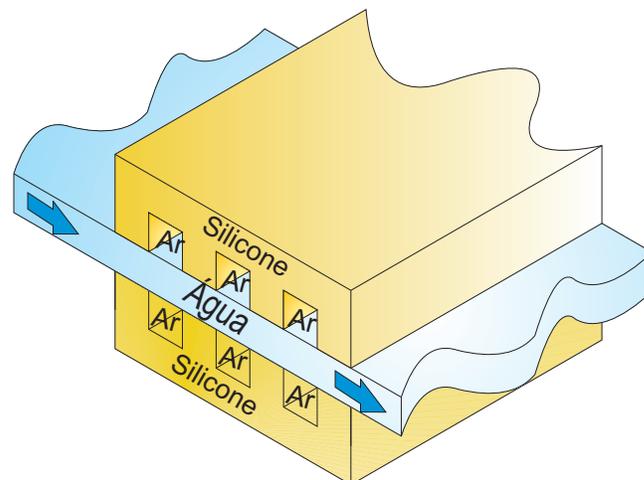


Figura 1.3: Micro Canais

A eficiência da redução de arraste pelo uso de micro ou nano cavidades ou ranhuras também é fortemente influenciada pela molhabilidade da superfície [2]. A figura 1.4 mostra o efeito a presença de nano cavidades no ângulo de contato, que passa de  $\theta \approx 120^\circ$  para  $\theta \approx 175^\circ$ , tornando a superfície mais hidrofóbica.

O uso destas superfícies em aplicações práticas também apresenta grandes desafios. O principal é a possibilidade de dissolução do ar permitindo assim o contato de água com a parede. Além disto, para evitar a invasão da água nas cavidades, a dimensão das mesmas deve ser bem pequena, aumentando consideravelmente o custo de fabricação destas superfícies.

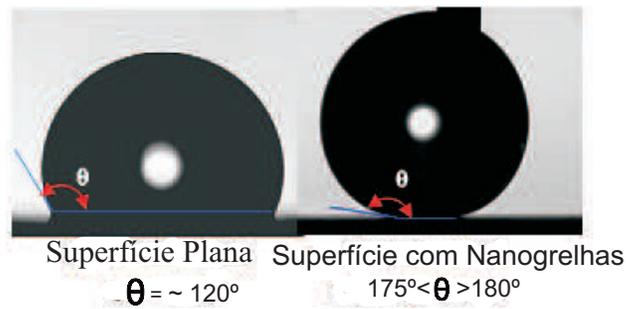


Figura 1.4: Ângulo de contato de uma superfície plana e uma com Nanogrelhas [2]

Neste trabalho, vamos modificar a idéia do uso de micro ranhuras, usando um líquido de baixa viscosidade dentro das cavidades. Apesar do efeito de lubrificação ser menor, a manutenção do líquido lubrificante dentro das cavidades não ocorre somente por efeito capilar, já que ao contrário do ar, o líquido é incompressível. Isto possibilita o uso de cavidades ou ranhuras maiores, diminuindo o custo de fabricação das superfícies.

Para uso desta metodologia na redução de arraste de escoamento laminar de óleos muito viscosos, várias questões devem ser analisadas:

- 1. Quão efetiva é a redução de arraste em função das propriedades dos fluidos, condições de operação e geometria?
- 2. Para que faixa de parâmetros a interface entre as duas fases é estável de forma a evitar a invasão do óleo nas ranhuras?
- 3. Qual é o comportamento do sistema no início do escoamento e após longas paradas?

Estas questões são analisadas neste trabalho através de um estudo numérico e experimental