



**XXVI CREEM**

Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica

**ILHÉUS/ITABUNA - BAHIA**



XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica,  
CREEM 2019  
19 a 23 de agosto de 2019, Ilhéus, BA, Brasil

## **ANÁLISE DO CORE ANNULAR FLOW EM DUTOS HORIZONTAIS**

Rafael Lemos Diniz, [catedral\\_rafa20@hotmail.com](mailto:catedral_rafa20@hotmail.com)  
Israel da Conceição Rocha, [israelr777@live.com](mailto:israelr777@live.com)  
Lucas Santos de Oliveira, [lucassantosdeoliveira2020@gmail.com](mailto:lucassantosdeoliveira2020@gmail.com)  
Fernando Nascimento Costa, [fernandoncosta@hotmail.com](mailto:fernandoncosta@hotmail.com)  
Karla Fabiana Rodrigues Nunes, [karlacomkfrn@gmail.com](mailto:karlacomkfrn@gmail.com)

Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, n 1000 – Jardim São Cristóvão, São Luís - MA  
Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz – Barão Geraldo, Campinas – SP  
Faculdade Internacional São Luís (ISL Wyden), Av. dos Holandeses, 10 – Calhau, São Luís – MA

**Resumo.** No constante desenvolvimento das mais variadas áreas da engenharia mecânica e principalmente da indústria petrolífera, o método Core Annular Flow (CAF) é de grande importância para o crescimento técnico e econômico. Analisando o escoamento fluidodinâmico bifásico envolvendo água – óleo pesado ultraviscosos em dutos horizontais, este trabalho faz uma correlação com a eficiência, o ganho e a forma como o escoamento é realizado. O CAF além de ser uma tendência no mercado petrolífero traz uma nova forma de pensar economicamente, os resultados alcançados são de grande importância para os estudos do escoamento bifásico, nesse sentido o estudo do CAF na indústria petrolífera mostrou que houve uma economia na perda de carga e assim foi certificado de que o seu uso em dutos horizontais é de grande valia para o escoamento, Logo que o comprometimento da relação do óleo pesado se mostrou um aliado e apresentou uma maior facilidade ao escoamento em companhia da água, contribuindo assim para uma economia dos custos operacionais industriais.

**Palavras chave:** Escoamento. Caf. Bifásico.

**Abstract:** In the constant development of the most varied areas of mechanical engineering and especially the petroleum industry, the Core Annular Flow (CAF) method is of great importance for technical and economic growth. Analyzing the two - phase fluid dynamics flow involving water - ultra viscous heavy oil in horizontal ducts, this work correlates with the efficiency, the gain and the way the flow is performed. The CAF, in addition to being a trend in the oil market, brings a new way of thinking economically, the results achieved are of great importance for studies of the biphasic flow, in this sense the study of CAF in the oil industry showed that there was an economy in the loss of cargo and thus has been certified that its use in horizontal ducts is of great value for the flow. As soon as the compromise of the heavy oil ratio proved to be an ally and presented a greater ease to the flow in the company of water, thus contributing to an economy of industrial operating costs.

**Key words:** Flow. Caf. Biphasic.

### **1. INTRODUÇÃO**

O transporte de óleos pesados tem sido um dos principais desafios tecnológicos da atualidade uma vez que esse fluido é caracterizado por uma alta viscosidade e densidade (Santos, et al., 2010). Uma das principais razões pelas quais as empresas petrolíferas têm sido motivadas a produzir óleos pesados é a pouca quantidade de reserva acessível de óleos leves devido a sua extração ao longo dos últimos anos (Andrade, et al., 2010).

A maior dificuldade na exploração de óleos pesados no mundo e principalmente no Brasil é o modo como esse produto é transportado através de tubulações devido a sua alta viscosidade.

Uma forma de reduzir este problema é adicionar ao óleo um componente imiscível de menor viscosidade como a água e, assim, obter uma mistura com viscosidade efetiva mais baixa. Porém, uma mistura de dois ou mais componentes imiscíveis pode escoar de acordo com várias configurações topológicas, que são chamadas de padrão de escoamento. Portanto, a capacidade de diagnosticar e controlar o padrão de escoamento é imprescindível para a operação eficaz de instalações industriais. (Bannwart, et al., 2006).

Segundo Joseph (1997) e Prada (2000), a técnica "core-flow" consiste na injeção de pequenas quantidades de água junto às paredes de uma tubulação a uma vazão menor que a do óleo, fazendo com que o óleo pesado seja envolvido por uma camada de água e escoe no centro do tubo sem tocar nas paredes internas do mesmo.

## ANÁLISE DO CORE ANULAR FLOW EM DUTOS HORIZONTAIS.

Essa tecnologia consiste no transporte de óleos pesados através de grandes distâncias que seja vertical ou horizontal onde o óleo se situa na parte central do duto e a água segue o mesmo caminho só que pelas laterais do duto evitando assim que o óleo não tenha contato com as paredes do mesmo. Neste trabalho aplica-se o estudo dos transportes de óleos pesados em dutos horizontais atualizados ao cenário tecnológico mundial e nacional, a análise da eficiência e uma breve pesquisa sobre molhabilidade, estabilidade e desempenho.

## 2. METODOLOGIA

Foi realizada uma vasta revisão bibliográfica com relação ao core anular flow em dutos horizontais, onde foi analisado os fatores que auxiliam no transporte do escoamento bifásico e realizou-se o estudo nos seguintes tópicos:

- Escoamento em dutos horizontais;
- Molhabilidade e oxidação de superfícies;
- Estabilidade hidrodinâmica do core flow e desempenho;

Considerando-se fluidos newtonianos, escoamento permanente e incompressíveis, além das equações vigentes de escoamento no transporte horizontal como coeficiente de arrasto e atrito dentre outros, onde se chegou a resultados e discussões relevantes a nova tecnologia aplicada.

### 2.1. Formulação

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (1)$$

$$z_1 = z_2$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \int_{vc} p dV + \int_{vc} \vec{V} d\vec{A} = 0 \quad (2)$$

As considerações a serem feitas são:

- Fluido incompressível;
- Volume de controle não deformável, de forma e tamanhos fixos;
- Velocidade uniforme nas seções a serem analisadas;
- Linhas de corrente retilíneas (sem elevação);
- Escoamento invíscido;
- Escoamento permanente;

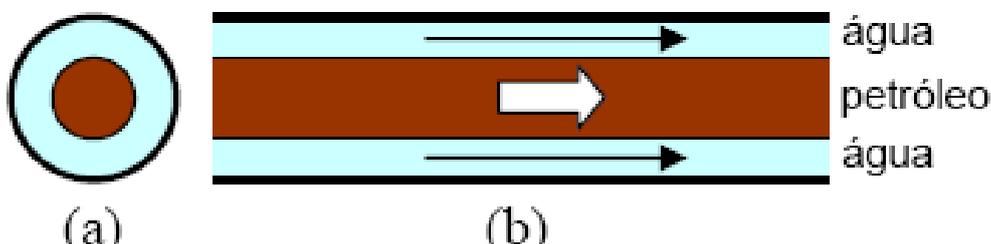
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A técnica CAF consiste basicamente em injetar água em uma tubulação em um fluxo menor que o óleo, fazendo com que o óleo seja envolvido por uma camada de água, sem tocar na parede da tubulação, formando assim um padrão anular (Andrade *et al.*, 2013).

O escoamento de forma heterogênea mostra que a água escoando de forma conjunta ao óleo apresenta uma maior velocidade em comparação ao óleo pesado pelo fato de ser mais viscosa, a espessura dessa interface deve ser bem definida para que possa se ter um ganho econômico com relação a esse procedimento.

No escoamento de dois líquidos imiscíveis, o líquido de menor viscosidade (água) se encontra na região de deformação (paredes da tubulação) lubrificando o escoamento do óleo, e assim, possibilitando seu transporte com menor perda de carga. Este fato torna atrativa a aplicação desta técnica não apenas na área de transporte, como também na área de elevação de óleos pesados e ultraviscosos (Prada, 1999). Abaixo temos uma figura esquemática de dois fluidos com viscosidades diferentes:

Figura 1. Esquema de um escoamento bifásico horizontal: (a) seção; (b) lateral (Bordalo e Oliveira, 2007)



### 3.1. Escoamento em dutos horizontais

O escoamento de um fluido em um tubo tende a ser ordenado para baixas velocidades. Entretanto, a medida que a velocidade cresce acima de um determinado valor crítico, o escoamento passa a apresentar comportamento desordenado. Dessa forma, diz-se que o regime de escoamento é laminar quando está caracterizado por linhas de corrente suaves e movimento altamente ordenado. Entretanto, quando ocorrem flutuações de velocidade e movimentos altamente desordenados, ocorre o regime de escoamento Turbulento (Cimbala, 2007).

Os óleos pesados são usualmente definidos como óleos com grau API inferior a 20° (ou seja, uma densidade relativa superior a 0,93). Estes óleos contêm metais pesados como Vanádio e Níquel, e também Enxofre. Apesar de ser muito viscoso, o óleo pesado tem um comportamento de fluido Newtoniano, sendo a viscosidade uma função somente da temperatura. (Maribel, 2016).

O "API", porém, não descreve completamente as propriedades do óleo pesado: a viscosidade é uma propriedade mais característica. Por exemplo, alguns crus podem ser pesados, mas tem uma viscosidade relativamente baixa a temperatura do reservatório, se comparado com alguns crus mais leves (Briggs, 1988) a tabela abaixo mostra dados da água e do óleo de acordo com a API.

Tabela 1. Viscosidade e propriedades dos fluidos de acordo com a API (Andrade, 2008)

Fluido	Propriedades		Velocidade (m/s)	Coeficiente de arrasto	Tensão Superficial (N/m)
	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (Pa.s)			
Água	997	0,000889	1,65	0,44	0,062
Óleo	989	2,7	0,95		

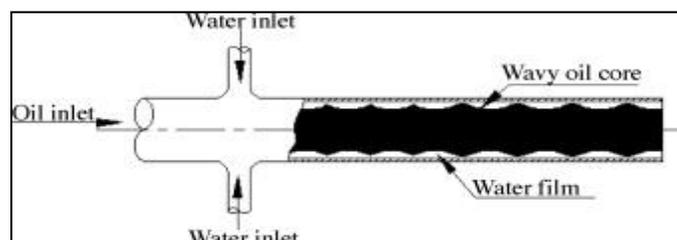
A técnica de escoamento core anular, também chamada de core flow, vem sendo aplicada na maioria dos estudos referentes ao escoamento anular líquido-líquido, sob condições de escoamento horizontal. Esta tecnologia tem como aplicação o transporte de óleos pesados e ultraviscosos através de linhas ou dutos (Prada, 1999). Segundo (Brauner, 1991) essa técnica parece ser mais atraente do ponto de vista da redução da perda de carga nas linhas de transporte de líquido, sendo a de maior interesse em processos tecnológicos.

Esse método core anular foi proposto pela primeira vez por Clark e Shapiro em 1949. Foi realizada uma aplicação prática de o escoamento anular para o transporte de óleo. Contudo, observaram que a diferença de massa específica entre a água-óleo, além da elevada viscosidade do óleo, resultaria na água envolvendo ou "lubrificando" o óleo (Prada, 1999).

Estudos recentes mostram que experimento do tipo core anular flow no escoamento horizontal obtiveram inúmeros avanços.

Inúmeros estudos mostraram que a técnica core anular flow pode ser aplicada para outros fluidos bastantes viscosos além do petróleo. Na indústria química e farmacêutica, fluidos de baixa viscosidade e imiscível são usados para diminuir as quedas de pressão em torno das misturas viscosas líquido-líquido (Ghosh et al., 2009). Abaixo temos o exemplo de uma figura de um duto no sentido horizontal onde é aplicado a técnica core anularflow.

Figura2. Duto horizontal aplicado a técnica core annular flow. (Ghosh et al., 2009).



Este regime é caracterizado por um filme de água que lubrifica o núcleo central onde se localiza o óleo, causando uma redução na queda de pressão longitudinal (Bannwart, 2001). Em um escoamento core anular horizontal água-óleo, existe a diferença de massa específica entre os fluidos, o núcleo de óleo (mais leve) tende a ocupar uma posição

## ANÁLISE DO CORE ANULAR FLOW EM DUTOS HORIZONTAIS.

excêntrica ao eixo do duto (na parte superior) e a presença de ondas na interface entre o óleo e a água induz a movimento secundário perpendicular ao eixo do duto (Andrade, 2008).

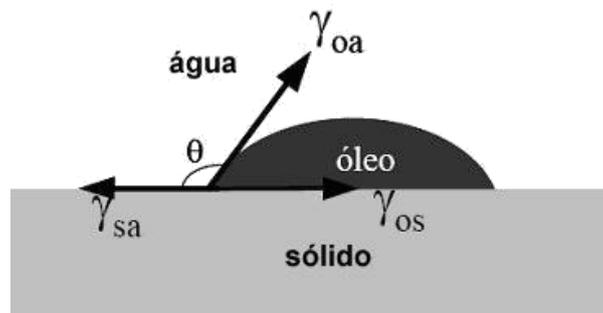
Experimentos feitos por (Prada, 1999) concluíram que para líquidos com massa específicas iguais e a uma fração de água fixa, existe uma velocidade superficial de óleo mínima, na qual uma velocidade abaixo dessa o escoamento core anular não pode ser mantido. Foi então observado o regime de escoamento pistonado óleo em água. No entanto para situações em que as massas específicas são muito diferentes, o regime de escoamento estratificado é o esperado. Esse regime de escoamento estratificado é uma forma de lubrificar parcialmente o escoamento de óleo, diferenciando um pouco do regime core anular (Prada, 1999).

### 3.2 Molhabilidade e oxidação de superfícies

Molhabilidade pode ser entendida como a capacidade de um fluido se espalhar dentro de um duto na presença de outro fluido de densidade diferente. Estudos de molhabilidade são importantes para entender o processo de escoamento destes até dutos.

Hirasaki (1991) argumentou que a molhabilidade pode ser determinada pela espessura do filme de água. Se o filme que separa o óleo da superfície sólida for estável o sistema continua molhado por água. Se o filme for instável, poderá se romper, possibilitando a saída de algumas camadas moleculares de água, deixando então que o óleo entre em contato com a superfície sólida. Através da figura temos um vislumbre de como é o contato do líquido com a superfície.

Figura 3. Esquema do fluido em contato com a superfície (Silva *et al.*, 2006)



A equação que relaciona o ângulo de contato, medido na fase aquosa por convenção, e essas tensões é a Eq. (3) de Young (Zisman, 1964):

$$\gamma_{oa} \cos \theta = \gamma_{sa} - \gamma_{os} \quad (3)$$

Oxidação pode ser definida como a transformação de um corpo que pode ser causada pelo oxigênio ou não, nesse processo há uma perda de elétrons. A oxidação é um processo positivo na redução de elementos poluentes, assim tem grande influência no tipo de material utilizados na fabricação de dutos.

A molhabilidade sofre forte influência pelo pH da água em decorrência de seu ponto zero, que adquire ponto positivo quando em contato com uma superfície sólida. Quando em contato com uma superfície sólida assim a do ponto zero essa superfície adquire pontos negativos.

### 3.3 Estabilidade hidrodinâmica do core flow e desempenho

O escoamento anular aponta características fundamentais em relação ao transporte de óleos pesados, tais como a redução da perda de carga fazendo com que a produção de óleo pesado seja viável. Dessa forma, o estudo da estabilidade da CAF é necessário para apontar as causas de instabilidade do escoamento, e assim, indicar operações adequadas para que o escoamento seja estável (Andrade, 2013).

Diversos estudos com relação ao core annular flow foram desenvolvidos com propósito de melhorar a estabilidade de óleos pesados – água, em um estudo feito por “Joseph *et al.*, 1984”, que estudaram fluidos miscíveis, encontraram excelentes resultados no escoamento de dois fluidos de viscosidades diferentes, mas colocados sobre um dado gradiente de pressão. Logo notaram – se que os dois fluidos postos em uma interface excêntrica o fluido de viscosidade superior é conduzido sob auxílio do fluido menos viscoso visto na parte central que os óleos pesados se concentram da tubulação. A estabilidade foi examinada com as equações do modelo bifásico, como no trabalho de Brauner e foi assumido um fluxo de estado quase permanente para a fase da água baseado em sua alta velocidade. (Brauner *et al.*, 1992) apresentou um modelo físico para este sistema. O modelo inclui numa mesma estrutura todas as situações possíveis de regimes de

fluxo: laminar - laminar, turbulento - turbulento e fluxo misto nas duas fases para uma gama de propriedades físicas (viscosidade e Densidade), e de um diâmetro da fase central,  $D_c$  (ou holdup in situ), e a correspondente perda de carga. Para o caso mais comum de núcleo de óleo viscoso laminar, com qualquer fase laminar ou turbulenta anular (água), simples soluções explícitas para  $D_c$  foram obtidas.

O problema da estabilidade hidrodinâmica é a determinação das condições de velocidade, propriedades dos fluidos, fração da água, excentricidade, para os quais as configurações de estabilidade do *core flow*, devem ser mantidas. A estabilidade determina o tipo de padrão de fluxo, à medida que os parâmetros de fluxo mudam, alguns padrões ganham mais estabilidade, contudo, outros se tornam instáveis (Prada, 1999). Segundo (Sotgia, Tartarini e Stalio 2008), a velocidade superficial do óleo depende em geral de vários parâmetros geométricos, tais como: diâmetro do tubo, rugosidade, ângulo de contato, dentre outros.

A tensão interfacial é um fator de grande influência na estabilidade do escoamento anular, pois ela modela a curvatura na interface óleo-água ajudando na compreensão da configuração do padrão CAF (Andrade, 2013).

Uma das causas de instabilidade no escoamento anular é a viscosidade, bem como a estratificação causada pela diferença de densidade dos dois líquidos imiscíveis, que escoam ao mesmo tempo em uma tubulação. Vários pesquisadores têm investigado a instabilidade da estratificação causada pela viscosidade no escoamento *Cou tee* (completamente desenvolvido) e no escoamento *Poiseuille* (pistonado) (Ghosh *et al.*, 2009).

Na utilização do *core anular flow* notou-se através de pesquisas e estudos que ele reduz a pressão, visto que faz com que o fluido mais viscoso tenha um melhor escoamento variando a velocidade superficial da água de 0,44-1,32 m/s. observou-se que no núcleo há uma maior concentração do óleo, além de destacar que o Sistema óleo- água o correu em uma região hidrodinâmica completamente evoluída, garantindo a queda de pressão, uma maior eficiência do escoamento e um maior ganho para as indústrias petrolíferas.

#### 4. CONCLUSÃO

Todos os resultados encontrados nesta revisão bibliográfica tiveram como principal objetivo analisar os diferentes aspectos do CAF com referências ao estudo teórico onde são analisados o escoamento, a viscosidade e ganho de eficiência, a sua molhabilidade e o sentido horizontal do escoamento, logo os estudos se mostraram proveitosos do ponto de vista acadêmico, pois o desenvolvimento dessa técnica se mostrou um meio econômico para o mercado industrial.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos primeiramente de agradecer a Deus, que nos possibilitou o conhecimento para a realização desse trabalho. Dedicamos essa pesquisa a nossa família que nos motiva e apoia a cada dia. Agradecemos a Universidade Estadual do Maranhão que nos apoia com materiais, que se fizeram essenciais.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Andrade, T. H. F. *Transporte de Óleos Pesados e Ultraviscosos Via Core-flow: Aspectos Geométricos e Termofluidodinâmicos*. 2013. 143f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.
- Andrade, T. H. F. de. *Estudo Numérico do Transporte de Óleos Pesados em Tubos Lubrificados por Água*. Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2008.
- Bordalo, s. n.; Oliveira, R, C. *Escoamento bifásico óleo-água com precipitação de para finas em dutos submarinos de produção de petróleo*. 4<sup>o</sup> Pdpetro, Campinas, SP, Outubro 21-24, 2007.
- Bannwart, A.C. *The role of surface tension in core-annular flow*. In: 2nd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Pisa, Italy, 1999.
- Briggs, P. J., Baron, R. p., Fulleylove, R. J. Wright, M. S. *Development of Heavy - Oil Reservoirs*. SPE 15748, 1988, p. 206-214.
- Brauner, N., (2001), *The prediction of dispersed flows in liquid-liquid and gás- liquid systems*. *Int. J. Multiphase Flow*, 27, 59-76.
- Çengel, y. A.; Cimbala, J. M. *Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações*. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.
- D. D. Joseph, R. Bai, K. P. Chen, and Y. Y. Renardy, “*Core-annular flows*,” *Annu. Rev. Fluid Mech.* 29, 65–90 (1997).
- Ghosh, S.; Mandal, T.K.; Das, G.; Das, P.K., *Review of Oil Water Core Annular Flow*, pp. 1-9, Elsevier (2009).
- Hirasaki, G. J. Wettability: *Fundamentals and surface forces*. *SPE Formation Evaluation*, p.217-226, june 1991
- Joseph, D. D., Renardy, M. & Renardy, Y. *Instability of the Flow of Two Immiscible Liquids with Different Viscosities in a Pipe*. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, Vol. 141, pp. 309- 317.

Rafael Lemos Diniz, Israel da Conceição Rocha, Lucas Santos de Oliveira, Fernando Nascimento Costa e Karla Fabiana Rodrigues Nunes.

#### **ANÁLISE DO CORE ANULAR FLOW EM DUTOS HORIZONTAIS.**

Kimura, Artur; Oliveira, Carolina Valente de; Nogueira, Elcio. “*Hidrodinâmica de Líquidos Imiscíveis (Água-Óleo) em escoamentos internos: Seção Reta Circular e Placas Planas Paralelas*”. Cadernos UniFOA. VoltaRedonda, Ano VI, n. 17, dezembro 2011. Disponível em: <http://www.unifoa.edu.br/cadernos/edicao/17/17.pdf>

Maribel, R.O. Vara. *Hidrodinâmica do Escoamento Bifásico Óleo Pesado- água em urn Tuba Horizontal*. Universidade estadual de campinas. Agosto 2000.

Prada, J. W. V. *Estudo experimental do escoamento anular óleo-água (core flow) na elevação de óleo ultraviscosos*. Universidade Federal de Campinas- Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas – SP, 1999.

Silva, R.C.R.; Mohamed, R.S.; Bannwart, A.C., *Wettability Alteration of Internal Surfaces of Pipelines for use in the Transportation of Heavy Oil via Core-flow*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 51, Nº 1-2, pp. 17–25, (2006).

Sotgia, G.; Tartarini, P.; Stalio, E., *Experimental Analysis of Flow Regimes and Pressure Drop Reduction in Oil–Water Mixtures*, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 34, pp. 1161–1174 (2008).

Zisman, W. A. *Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution*. In: Contact angle, wettability and adhesion. Washington, D.C.: American Chemical Society. Advances in chemistry series 43, p.1-51, 1964.

#### **7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores Rafael Lemos Diniz, Israel da Conceição Rocha, Lucas Santos de Oliveira, Fernando Nascimento Costa e Karla Fabiana Rodrigues Nunes são os únicos responsáveis pelo material impresso contido nesse artigo.