

## ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO LAMINAR EM DUTOS DE ÓLEOS PESADOS COM VISCOSIDADE DEPENDENTE DA TEMPERATURA

**Pedro Torres, Guilherme Bessa e Luis Fernando A. Azevedo**

PUC-RIO, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Curso de Engenharia de Petróleo

Campus: Gávea – Bairro: Gávea - CEP 22451-900 – Rio de Janeiro – Rio de Janeiro

E-mail para correspondência: Lfaa@puc-rio.br

### Introdução

As reservas mundiais de óleos pesados apresentam números expressivos e, no Brasil, as estimativas são de que eles representam 30% das reservas provadas. Como se trata de uma das principais reservas de energia do país, tendo grande incidência nas águas profundas da Bacia de Campos, é de fundamental importância o desenvolvimento de pesquisas sobre este tema, a fim de auxiliar na elaboração de projetos mais eficientes para a sua exploração e seu transporte. Este tipo de óleo é caracterizado por alta viscosidade, elevada massa específica, forte relação entre temperatura e viscosidade e apresentam comportamento semelhante ao dos fluidos Newtonianos.

No transporte deste fluido, como pode ser observado na Fig. 1, ocorre troca de calor através das paredes do tubo, ocasionando uma variação da temperatura do fluido ao longo da linha. Esta variação de temperatura acarreta numa grande variação da viscosidade do óleo, fazendo com que o perfil de velocidade se afaste do comportamento parabólico, típico de escoamentos laminares com viscosidade constante. Isto dificulta a determinação da perda de carga do sistema e, também, o projeto das linhas de transporte.

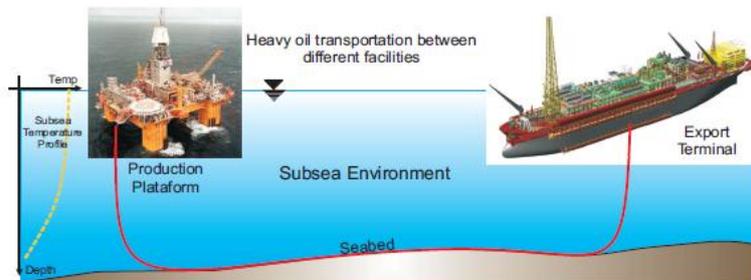


Figura 1 – Transporte marítimo de petróleo

Alguns estudos já foram realizados nesta área. Ockendon et al (1977) fez contribuições relevantes ao estudar o escoamento laminar com elevadas variações de viscosidade, para um Número de Reynolds baixo. Foi analisado o escoamento bi – dimensional de um fluido Newtoniano em fluxo constante, dentro de um tubo retangular. Para este estudo, foi assumido que as paredes do canal estavam aquecidas e os efeitos de transferência de calor foram descartados.

Whitehead et al. (1991) considerou um fluido em fluxo dentro de um tubo com paredes refrigeradas e com viscosidade linearmente dependente da temperatura. Em contrapartida, Quinones et al. (2010) realizou simulações numéricas a fim de modelar as propriedades da glicerina e desenvolveu um modelo assintótico para a viscosidade da glicerina.

### Objetivos

Neste trabalho, busca-se determinar experimentalmente a perda de carga e os perfis de velocidade e de temperatura do escoamento em função das diferentes variáveis do processo, utilizando a seção de testes, termicamente isolada, desenvolvida para o projeto. A partir dos resultados obtidos, espera-se validar modelos

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
 Artigo CREEM2012

numéricos que estão sendo desenvolvidos em paralelo ao presente projeto, em um esforço conjunto para um melhor entendimento deste tema.

**Metodologia**

Primeiramente, definiu-se a glicerina como fluido de trabalho, devido ao fato de sua viscosidade e sua massa específica serem semelhantes às dos óleos pesados. Além disso, este fluido possui transparência à luz fluorescente – condição importante para a técnica utilizada na medição do perfil de velocidade – e possui comportamento semelhante ao dos fluidos Newtonianos. A Figura 2 representa a curva de viscosidade da glicerina e a Fig. 3 representa sua massa específica.

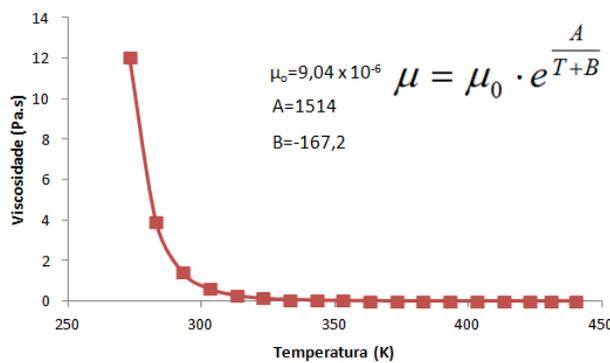


Figura 2 – Curvas qualitativa de viscosidade da glicerina

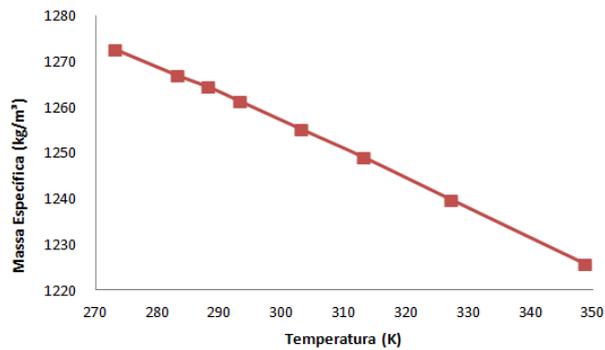


Figura 3 – Curva qualitativa de massa específica da glicerina

Em seguida, deu-se início ao projeto da seção de testes, cujo objetivo era reproduzir, experimentalmente, a curva dimensional de *Pressão vs Vazão*, ilustrada na Fig. 4, fornecida por simulação numérica.

XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP  
Artigo CREEM2012

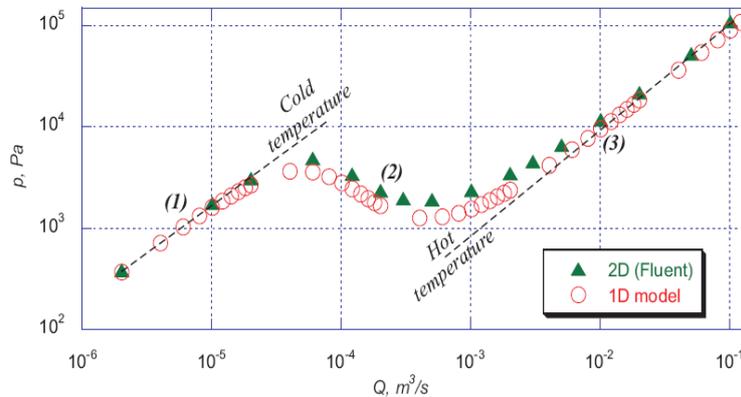


Figura 4 – Curva teórica de pressão vs vazão

Além desta, visou-se, também, a reprodução experimental da curva adimensional do *Parâmetro P* vs o *Número de Reynolds Reduzido*. A Figura 5, abaixo, mostra este gráfico.

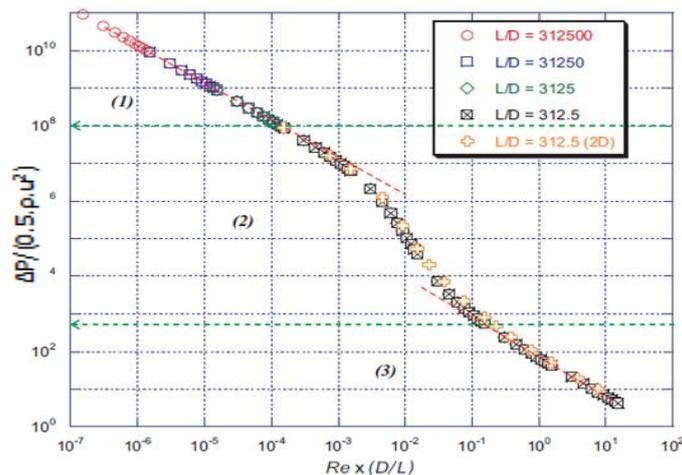


Figura 5 – Curva Adimensional de P vs Número de Reynolds Reduzido

O *Parâmetro Adimensional P* representa a queda de pressão ao longo da seção de testes. Já o *Número de Reynolds Reduzido* representa a relação entre o *Número de Reynolds* e os dados geométricos – *diâmetro (D)* e *comprimento (L)* – da tubulação. A Equação (1) representa o *Número de Reynolds Reduzido*. Já a Equação (2) representa o *Parâmetro Adimensional P*:

$$\text{Re}\left(\frac{D}{L}\right) = \frac{\rho u D}{\mu} \left(\frac{D}{L}\right) \quad (1)$$

$$P = \frac{\Delta P}{0,5 \rho u^2} \quad (2)$$

Na Equação (1), *Re* é o *Número de Reynolds*, um parâmetro adimensional; *D*, cuja unidade é Metro, é o diâmetro da seção de testes; *L*, cuja unidade é Metro, é o comprimento total da seção de testes;  $\rho$ , cuja unidade é Kilograma por Metro Cúbico, é a massa específica do fluido de trabalho; *u*, cuja unidade é Metro por Segundo, é a velocidade do escoamento, ao longo da direção horizontal;  $\mu$ , cuja unidade é Pascal vezes Segundo, é a viscosidade dinâmica do fluido de trabalho.

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
Artigo CREEM2012

Na Equação (2),  $P$  é a Variação Adimensional de Pressão;  $\Delta P$ , cuja unidade é Pascal, é a variação de pressão ao longo da linha;  $\rho$ , cuja unidade é Kilograma por Metro Cúbico, é a massa específica do fluido de trabalho;  $u$ , cuja unidade é Metro por Segundo, é a velocidade do escoamento, ao longo da direção horizontal.

A Figura 6 mostra o projeto da seção de visualização, que será utilizada para realizar as medições dos perfis de velocidade e de temperatura.

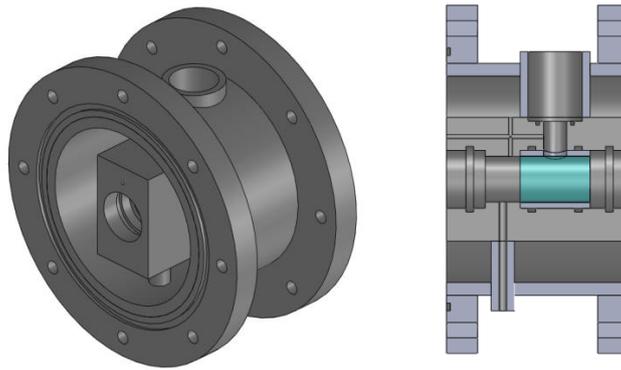


Figura 6 – Seção de visualização

### Validação da Seção de Testes

Com a seção de testes projetada e montada, era preciso saber se a mesma seria capaz de reproduzir o fenômeno desejado e de forma precisa. Para isso, foram realizados testes preliminares, com viscosidade constante, consistindo na medição da variação de pressão ao longo da linha e na sua comparação com a variação de pressão teórica, calculada através de fórmulas apropriadas para as características do experimento.

Para realizar este procedimento, o banho termostático de água foi mantido desligado, para não haver troca de calor e variação de temperatura, e definiu-se a temperatura de trabalho da glicerina em 296,5 K, ou seja, 23,5°C. Feito isto, foram percorridas algumas vazões e foram medidas as variações de pressão correspondentes. Abaixo, na Tab. 1, pode ser visto um dos dados experimentais medidos.

Teste Experimental (Temperatura @ 23,5°)	$\Delta P$ (Variação de Pressão)		Q (Vazão)
	mmHg	Pa	m <sup>3</sup> /s
	137	15126,70564	3,55*10 <sup>(-6)</sup>

Tabela 1 – Resultados experimentais

De acordo com a teoria, para um escoamento laminar completamente desenvolvido, com viscosidade constante, em dutos circulares e horizontais, a variação de pressão pode ser calculada de acordo com a Eq. (3), mostrada abaixo.

$$\Delta P = \frac{128\mu LQ}{\pi D^4} \quad (3)$$

Na Equação (3),  $\Delta P$ , cuja unidade é Pascal, é a variação de pressão;  $\mu$ , cuja unidade é Pascal vezes Segundo, é o valor da viscosidade dinâmica do fluido de trabalho;  $L$ , cuja unidade é Metro, é o comprimento total da tubulação;  $Q$ , cuja unidade é Metro Cúbico por Segundo, é a vazão volumétrica do fluido de trabalho;  $D$ , cuja unidade é Metro, é o diâmetro da seção de trabalho.

Com isso, podemos calcular a variação de pressão teórica e comparar com a vazão experimental. A Tabela 2, abaixo, mostra esses valores e a comparação, bem como o erro experimental.

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
 Artigo CREEM2012

$\Delta P$ Teórico	$\Delta P$ Experimental	Erro Experimental
Pa	Pa	%
15051,61357	15126,70564	0,5

Tabela 2 – Comparação entre as vazões teórica e experimental

Como pode ser visto, o erro experimental, que indica a diferença percentual entre os valores teórico e experimental, é igual a 0,5%, um valor aceitável. Isto indica que a seção de testes é adequada para os experimentos requeridos.

### Procedimento Experimental

Para reproduzir, em laboratório, algumas das condições reais do escoamento, a temperatura de entrada da glicerina, que escoar em um tubo de 11,8mm de diâmetro interno, deve ser de 70°C. Este tubo está imerso em uma tubulação por onde circula água, com temperatura igual a 5°C. As temperaturas da água e da glicerina são controladas, respectivamente, por banhos termostáticos para baixas temperaturas e para altas temperaturas. As vazões desejadas da glicerina são ajustadas, com precisão, através de bombas de cavidade progressiva (BCP).

Os perfis de velocidade e temperatura serão levantados, respectivamente, por Velocimetria à Laser Doppler (LDV) e por termopares, utilizando-se a seção de visualização. A perda de carga do sistema é obtida através de transdutores de pressão instalados ao longo da seção de testes.

### Resultados e Conclusões

A curva de Pressão vs Vazão mostrada na Fig. 7, foi obtida experimentalmente nas condições descritas acima. Observa-se que os resultados apresentaram um comportamento coerente com as simulações. A precisão e a confiabilidade dos dados obtidos indicam que é possível reproduzir o fenômeno desejado no laboratório com o aparato experimental desenvolvido. No entanto, mais ensaios são necessários para que se possa detectar o motivo da descontinuidade dos dados apresentada na região de baixas vazões. Além disso, novos ensaios serão realizados para que se possa medir os perfis de velocidade e temperatura do escoamento.

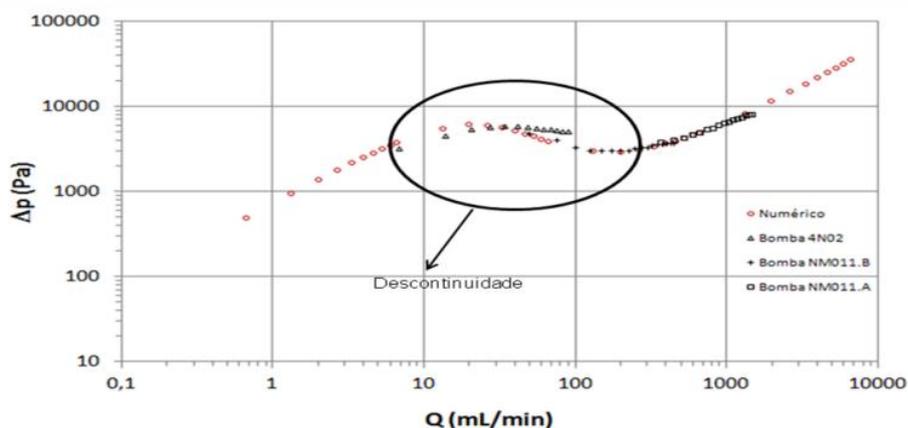


Figura 7 – Curva Experimental de Pressão vs Vazão

### Agradecimentos

Ao Prof. Luis Fernando A. Azevedo e ao Engenheiro Guilherme M. Bessa, pela confiança depositada. Aos demais funcionários e alunos do Laboratório de Engenharia de Fluidos que contribuem para o sucesso deste projeto.



Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos



**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
Artigo CREEM2012

**Referências Bibliográficas**

- Ockendon, H. and Ockendon, J. R., 1977, "Variable-viscosity flows in heated and cooled channels", J. Fluid Mech. 83, 177.
- Quinones, D. M. and Carvalho, M. S., 2010, "Pipeline flow of heavy oil with temperature-dependent viscosity", 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, ENCIT 2010.
- Whitehead, J. A and Helfrich, K. R., 1991, "Instability of flow with temperature dependent viscosity: A model of magma dynamics", J. Geophys. Res. 96, 4145