

EFEITO DE REVESTIMENTO NA PERDA DE CARGA DURANTE O ESCOAMENTO INTERNO DE ÓLEOS PESADOS

Aluno: Marcelo M. da Silva
Orientador: Paulo R. de Souza Mendes

Introdução

A importância dos petróleos pesados vem crescendo significativamente nos últimos anos em face de sua abundância no país e do cenário político internacional. A principal característica desse tipo de óleo é sua alta viscosidade e a conseqüente dificuldade de transporte. Altas potências de bombeamento são necessárias para manter o escoamento de um óleo pesado em um oleoduto.

Sabe-se que muitos desses petróleos pesados têm características reológicas viscoplásticas. Materiais com tal tipo de comportamento mecânico, sob certas condições de escoamento ainda não muito bem conhecidas, apresentam deslizamento aparente na parede ao escoar internamente. Esse deslizamento tem o potencial de diminuir substancialmente a perda de carga em um escoamento.

Existe evidência experimental que leva a crer que o grau de deslizamento depende de duas propriedades da superfície interna do duto, a saber, a rugosidade e a molhabilidade (ou ângulo de contato). Portanto, em princípio, diferentes tipos de revestimento interno devem implicar diferentes características de deslizamento.

Objetivos

O presente projeto, executado em colaboração com a USP, propôs-se a estudar o deslizamento aparente que ocorre em escoamentos de materiais viscoplásticos, visando a melhor entender em que condições esse fenômeno se manifesta.

Atividades

Para atingir o objetivo acima, selecionamos e caracterizamos reologicamente materiais viscoplásticos, que foram utilizados em um experimento que consistia no escoamento em um canal de placas paralelas. Estas placas eram revestidas com diferentes materiais (pela equipe da USP), e estes revestimentos tiveram medidas suas rugosidades e ângulos de contato. Nos experimentos, o material viscoplástico era forçado a escoar pelo canal, e a curva de vazão x pressão era medida para cada tipo de revestimento. Estes mesmos escoamentos foram simulados numericamente supondo a ausência de deslizamento, e portanto curvas teóricas de vazão x pressão também foram obtidas. A comparação entre as curvas teóricas e as experimentais correspondentes fornecia uma quantificação do deslizamento ocorrido nos experimentos.

Em resumo, o projeto constituiu-se das seguintes atividades:

- Reologia dos fluidos
- Ângulo de contato e rugosidade
- Escoamento entre placas paralelas – experimentos

A. Reologia dos fluidos

A caracterização reológica dos fluidos de trabalho foi efetuada com o auxílio de um reômetro ARES.

Recebemos o óleo de Urucu (leve) e o óleo de Marlin (pesado) com o intuito de utilizá-los como fluidos de trabalho, pois havia a suspeita de que estes óleos apresentavam comportamento viscoplástico. Com o reômetro rotacional ARES efetuamos a caracterização reológica desses óleos, que apresentaram comportamento newtoniano à temperatura de 25°C, conforme ilustram os Gráficos 1 e 2.

Utilizamos o método dos mínimos quadrados para a obtenção das propriedades reológicas a partir das curvas de escoamento. A partir do Gráfico 1 obtivemos a viscosidade do óleo de Urucu, $\eta_0 = 0,0081$ Pa.s, e a partir do Gráfico 2 obtivemos a viscosidade do óleo de Marlin, $\eta_0 = 0,427$ Pa.s.

Uma vez que ambos os óleos apresentaram comportamento newtoniano à 25°C (temperatura dos testes do escoamento através das placas paralelas), buscamos outros materiais com comportamento viscoplástico nesta temperatura. Os materiais escolhidos foram uma suspensão base óleo e uma dispersão de Carbopol em água.

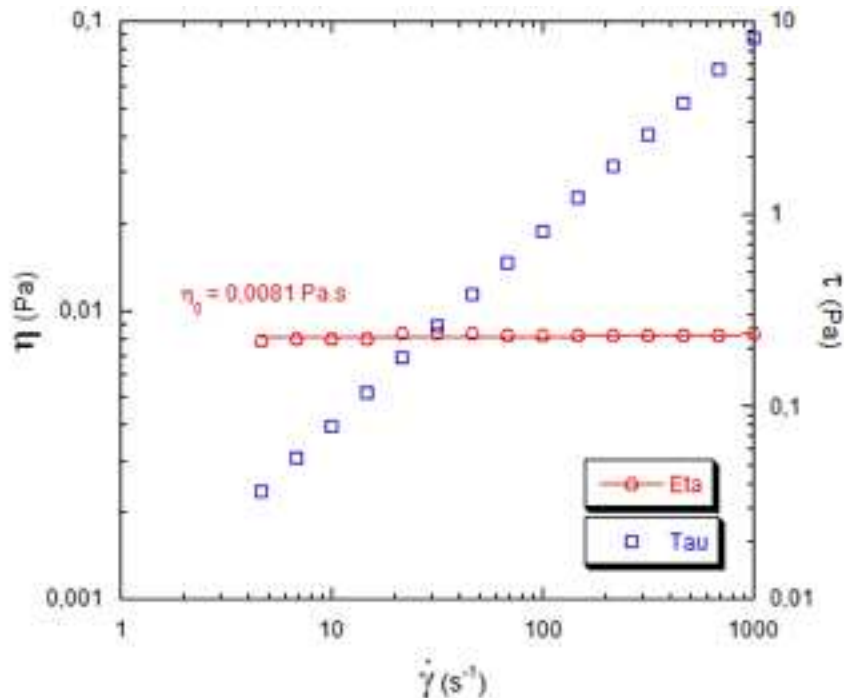


Gráfico 1 – Viscosidade x Taxa de Cisalhamento – Curva de escoamento do Óleo de Urucu.

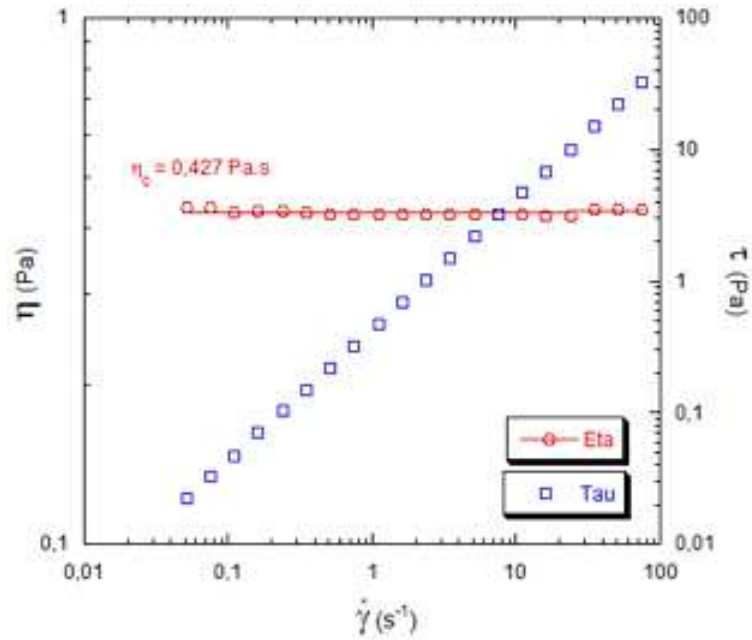


Gráfico 2 – Viscosidade x Taxa de Cisalhamento – Curva de escoamento do Óleo de Marlin.

A caracterização reológica destes últimos materiais também foi efetuada com o reômetro ARES, e a curva de escoamento foi ajustada com o modelo SMD (de Souza Mendes and Dutra, 2004), dado a seguir:

$$\eta = \left(1 - \exp\left[-\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau_0}\right]\right) \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1}\right)$$

Nesta equação, η_0 é a viscosidade a baixíssimas taxas de cisalhamento, τ_0 a tensão limite de escoamento, K o índice de consistência e n o índice de comportamento. Estas grandezas são obtidas a partir de um ajuste dos dados com o método dos mínimos quadrados. A curva de escoamento da dispersão de Carbopol 0,13% encontra-se no Gráfico 3 e a da suspensão base óleo encontra-se no Gráfico 4.

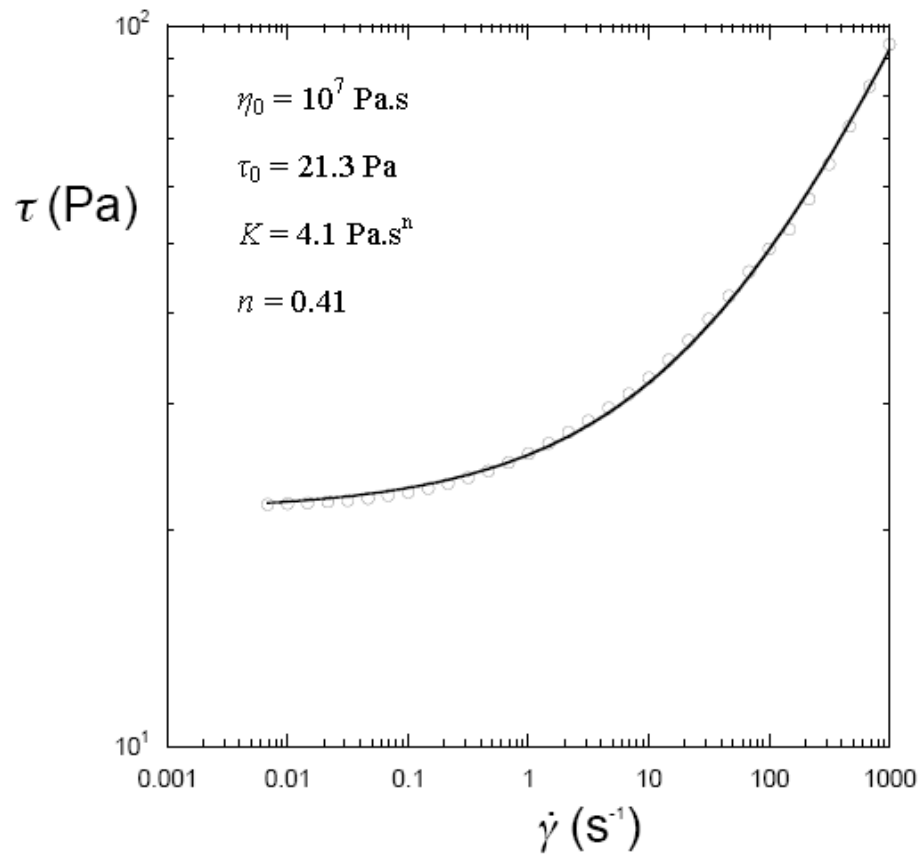


Gráfico 3 – Tensão Cisalhante x Taxa de Cisalhamento – Curva de escoamento da dispersão de Carbopol 0,13%.

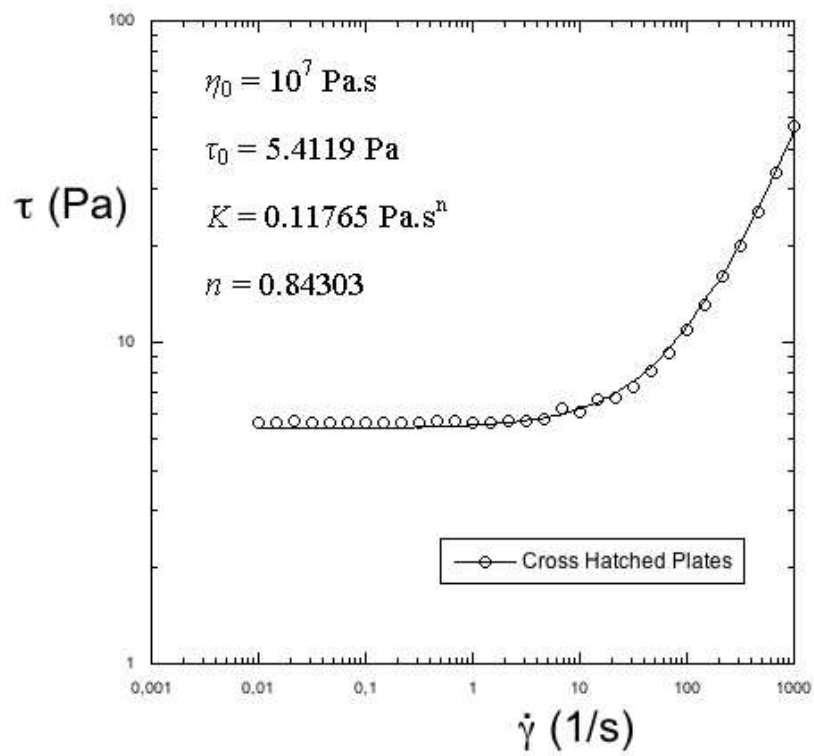


Gráfico 4 – Tensão Cisalhante x Taxa de Cisalhamento – Curva de escoamento da suspensão base óleo.

B. Ângulo de contato e rugosidade

Para investigar a dependência com a molhabilidade e a rugosidade do deslizamento que ocorre nas paredes durante o escoamento entre placas paralelas, foram efetuadas medições de ângulo de contato e de rugosidade das superfícies revestidas.

Metodologia

O ângulo de contato entre água ou óleo e os diferentes revestimentos testados foi medido com a utilização de um goniômetro SEO. A rugosidade das superfícies revestidas foi avaliada por medições realizadas com o auxílio de um rugosímetro. Algumas destas medições foram efetuadas na PUC-Rio, e outras na USP.

A Fig. 1 ilustra o processo de determinação do ângulo de contato. O goniômetro é ligado a um computador no qual utilizamos um software para captura das imagens da gota. O próprio programa realiza a medição do ângulo de contato (ver Fig. 2). Para cada revestimento, realizamos entre 5 e 10 medições para cada placa, tanto para as gotas de água quanto para as gotas de óleo, obtendo um valor médio para o ângulo de contato.

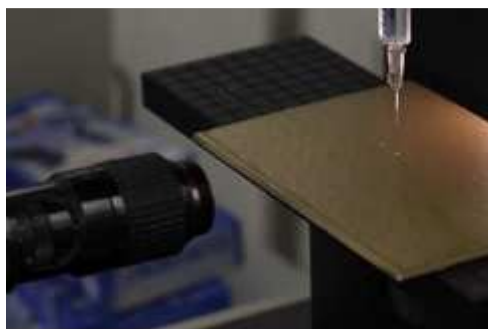


Figura 1. Medição do ângulo de contato com a utilização do goniômetro.



Figura 2. Imagem obtida pelo software utilizado para a medida do ângulo de contato.

A medição da rugosidade das placas revestidas foi efetuada no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD/ITUC/PUC-Rio). Essa medição foi realizada pelo método direto, em cinco posições diferentes igualmente espaçadas ao longo da superfície, utilizando-se o rugosímetro Taylor Hobson – Certificado de calibração no 0186/07 – LMD/ITUC/PUC-Rio.

Resultados

Os resultados das medidas relativas à primeira leva de placas encontram-se sumarizados na Tab. 1. Nesta tabela a coluna designada “Descrição” refere-se à composição dos revestimentos aplicados nas placas pela USP.

Tabela 1. Ângulo de contato e rugosidade – Primeira leva de placas.

Placa nº	Descrição	Ângulo de contato da água	Ângulo de contato do óleo	Rugosidade média (μm)
1	60% CF ₄ + 40% H ₂ 100 Mtorr / 2 min	82°	24°	0,086
2	60% CF ₄ + 40% H ₂ 100 Mtorr / 5 min	82°	18°	0,110
3	Aço Inox	86°	24°	0,051
4	Sem Tratamento	86°	34°	0,075
5	Carbono	93°	12°	0,239
6	80% CF ₄ + 20% H ₂ 500 Mtorr / 2 min	106°	46°	0,063
7	80% CF ₄ + 20% H ₂ 500 Mtorr / 5 min	112°	45°	0,070
8	Teflon	115°	38°	0,473
9	Sulfonadas e Fluoradas	129°	34°	0,107

Pela análise dos resultados da Tab. 1, podemos observar que o ângulo de contato depende tanto da composição do revestimento da placa quanto do fluido utilizado para efetuar a medida. Conforme era esperado, a placa de teflon possui um dos maiores ângulos para água por ser uma superfície hidrofóbica.

E na Tab. 2 encontram-se os resultados médios das medições efetuadas pela USP, relativas à segunda leva de placas.

Tabela 2. Ângulo de contato e rugosidade – Segunda leva de placas.

Amostras	Ângulo de contato médio da água (°)	Ângulo de contato médio do óleo (°)	Rugosidade média (μm)
1-4	80	24	0,30
5-8	80	24	0,17
9-12	80	24	0,17
13-16	80	24	0,16
17-20	111	32	0,30
21-24	31	24	0,30
25-28	62	23	0,30
29-32	114	48	0,30
33-36	110	36	0,30
37-40	116	36	0,30

C. Escoamento entre placas paralelas – experimentos

Metodologia

A planta experimental consiste de uma bomba de deslocamento positivo, uma seção de testes, um reservatório, um manômetro digital (sensor de pressão) e uma balança, conforme apresentado na Fig. 3.

A seção de testes consiste de duas placas paralelas de dimensões 100 mm de largura, 150 mm de comprimento e espessura não inferior a 5 mm, conforme apresentado na Fig. 4. A folga entre as placas é fixada em 1 mm. As placas, que constituem as paredes internas da passagem através da qual os óleos escoam (Fig. 5), podem ser substituídas para permitir a investigação de diferentes tipos de revestimento.



Figura 3. Planta experimental.



Figura 4. Seção de testes com placas inox sem revestimento.

Realizamos os testes de escoamento, bombeando os fluidos através da seção de testes e medindo a pressão na entrada das placas com um manômetro digital (Fig. 6). Dessa maneira, medimos a perda de carga durante o escoamento laminar entre as placas revestidas, de forma a poder avaliar o nível de deslizamento ocorrido.

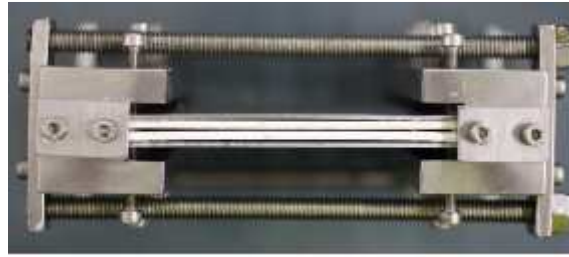


Figura 5. Seção de testes com as placas revestidas.

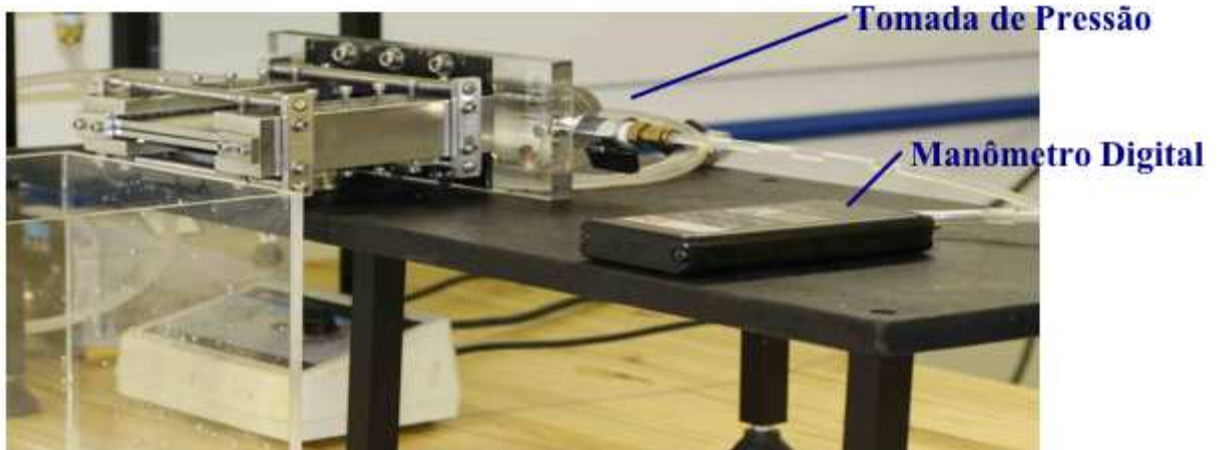


Figura 6. Tomada de pressão na entrada da placa.

Resultados

Testes Preliminares

Inicialmente, fizemos testes na planta experimental e validamos a montagem experimental usando fluidos newtonianos, que não apresentam deslizamento e cujos resultados são conhecidos por permitirem solução analítica. Para isso, utilizamos uma solução de água com glicerina a fim de obter uma viscosidade similar àquela com a qual trabalhamos. As placas utilizadas nesses testes foram as de aço inox sem revestimento. Os resultados experimentais concordaram com a solução analítica em menos de 5%.

Após a validação do procedimento experimental, realizamos os testes para as diversas placas revestidas utilizando uma dispersão de Carbopol 0,13% e obtivemos o resultado apresentado no Gráfico 5.

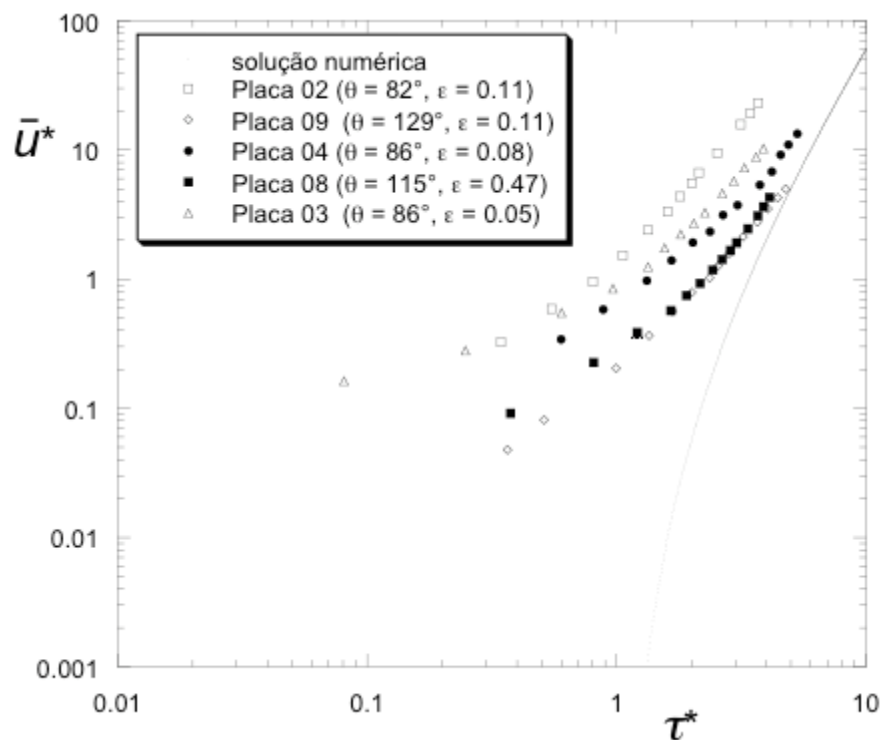


Gráfico 5 – Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede.

O Gráfico 5 fornece a velocidade média adimensional em função da tensão cisalhante na parede, também adimensional, para diferentes revestimentos. Nessa figura encontra-se também a solução numérica, que é obtida supondo não deslizamento na parede. Conseqüentemente, o desvio entre os dados experimentais e a solução numérica é uma medida do deslizamento ocorrido.

O Gráfico 5 mostra portanto que a placa que apresentou maior deslizamento foi a Placa 02, enquanto que a que apresentou o menor deslizamento foi a Placa 09. Coincidentemente, essas duas placas têm a mesma rugosidade ($0.11 \mu\text{m}$), enquanto que seus ângulos de contato são 82° para a Placa 02 e 129° para a Placa 09. Logo, esse resultado indica que o nível de deslizamento aumenta conforme o ângulo de contato diminui, ou seja, conforme a molhabilidade aumenta. Esta tendência é confirmada por pesquisas publicadas recentemente (Seth et al., 2008).

Por outro lado, as Placas 03 e 04 têm, coincidentemente, o mesmo ângulo de contato (86°), enquanto que suas rugosidades são diferentes ($0.05 \mu\text{m}$ para a Placa 03 e $0.08 \mu\text{m}$ para

a Placa 04). Como os dados da Placa 03 se desviam mais da solução numérica (e portanto apresentam maior grau de deslizamento) do que os dados da Placa 04, parece que o nível de deslizamento aumenta conforme a rugosidade diminui, conforme era esperado.

Testes com fluido à base de água

Efetuada os testes acima, recebemos da USP uma outra leva de placas com as rugosidades controladas por lixas de granulometrias diferentes e com diversos ângulos de contato. Nessa segunda leva de placas existiam placas com a mesma rugosidade e ângulos de contato diferentes e outras placas com aproximadamente o mesmo ângulo de contato, mas com rugosidades diferentes. Tanto a rugosidade quanto os ângulos de contato nos foram fornecidos com as placas.

No Gráfico 6 encontram-se outros quatro testes realizados com a solução aquosa de Carbopol em placas recebidas nessa segunda leva, com aproximadamente o mesmo ângulo de contato (80°), mas com rugosidades diferentes. Analisando esses resultados não observamos uma variação do deslizamento aparente com o aumento da rugosidade, conforme a literatura e os resultados anteriores sugerem. Isso ocorreu pelo fato de que a rugosidade de placa para placa não variou de forma significativa.

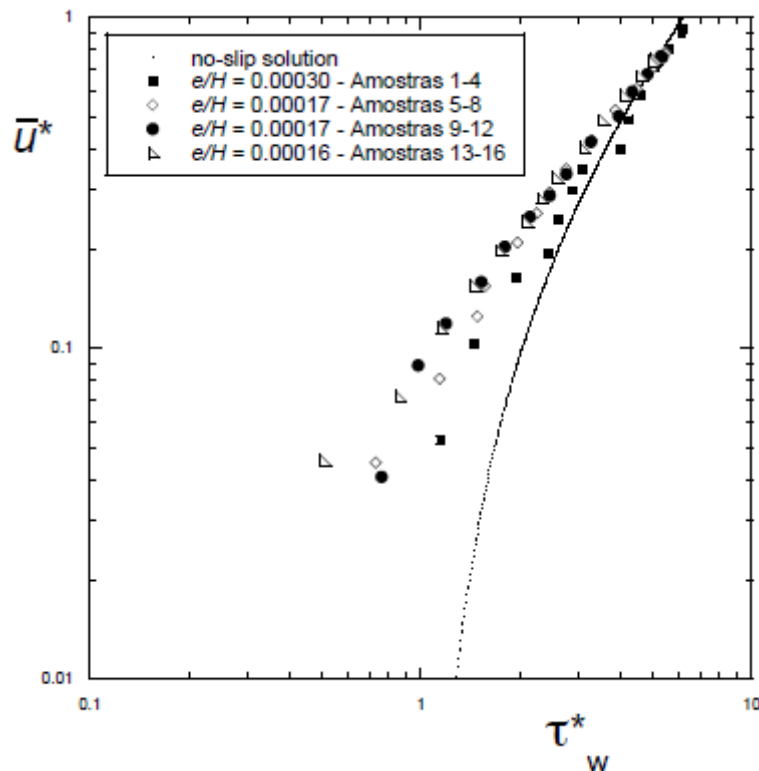


Gráfico 6 – Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito da rugosidade.

No Gráfico 7 podemos encontrar os resultados dos testes realizados nas placas dessa segunda leva, que apresentavam rugosidades aproximadamente iguais, mas com ângulos de contato diferentes. Analisando esses resultados observamos a mesma tendência obtida anteriormente. Como nos resultados anteriores e também de acordo com a literatura (Seth et al., 2008), quanto maior o ângulo de contato do fluido base com a superfície, menor é o deslizamento. Logo, mais uma vez vemos que o grau de deslizamento aumenta conforme o ângulo de contato diminui, ou seja, conforme a molhabilidade aumenta.

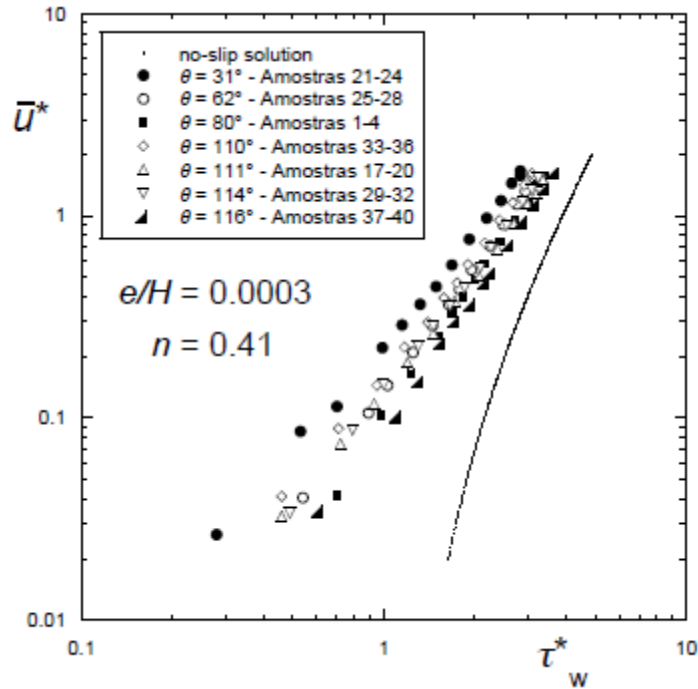


Gráfico 7 – Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do ângulo de contato.

Já no Gráfico 8 podem-se encontrar todos os resultados obtidos com as placas da segunda leva e um mesmo carbopol. A análise desses resultados mostra que a placa 21-24, que é a que tem o menor ângulo de contato com a água, apresenta o maior deslizamento, enquanto que a placa 37-40, que está entre as que têm o maior ângulo de contato com a água, apresenta o menor deslizamento, ilustrando a mesma tendência observada anteriormente. Dessa forma, mais uma vez observasse que quanto maior o ângulo de contato da superfície com a água menor é o deslizamento.

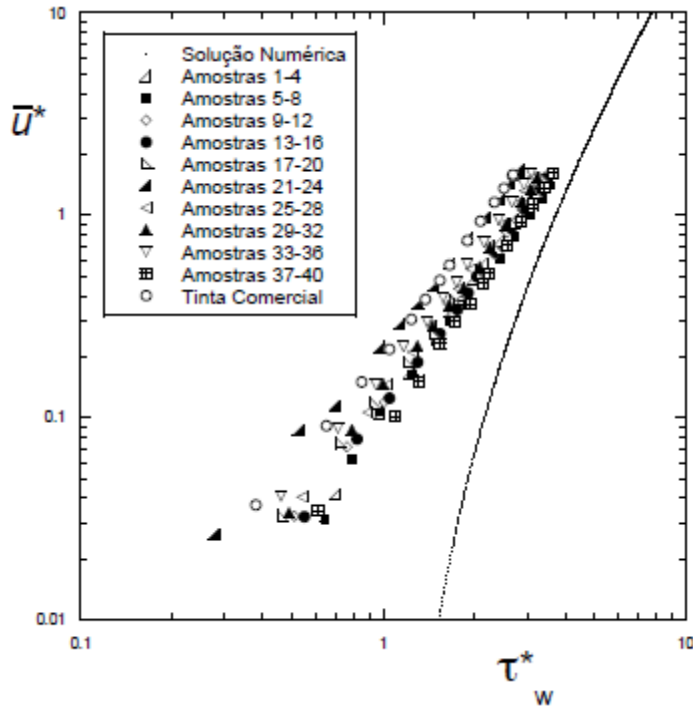


Gráfico 8 – Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Testes realizados com Carbopol escoando através das placas da segunda leva.

Testes com fluido à base de óleo

Realizados os testes com a dispersão de Carbopol 0,13%, demos início aos testes com a suspensão à base de óleo com o objetivo de confirmar as tendências anteriormente obtidas e esperadas. O primeiro passo foi a realização de um escoamento entre placas paralelas suficientemente rugosas para comprovar que a solução numérica das equações governantes obtida descreve o caso de não deslizamento. Esses resultados podem ser encontrados no Gráfico 9. Nessa figura podemos observar que quando a tensão adimensional na parede assume um valor inferior a 1, a velocidade média adimensional cai a valores desprezíveis, significando que a suspensão praticamente pára de escoar. Observamos também que os resultados experimentais concordam muito bem com a solução numérica das equações governantes obtida, comprovando que, quando não há deslizamento, o experimento é bem descrito pela modelagem matemática apresentada.

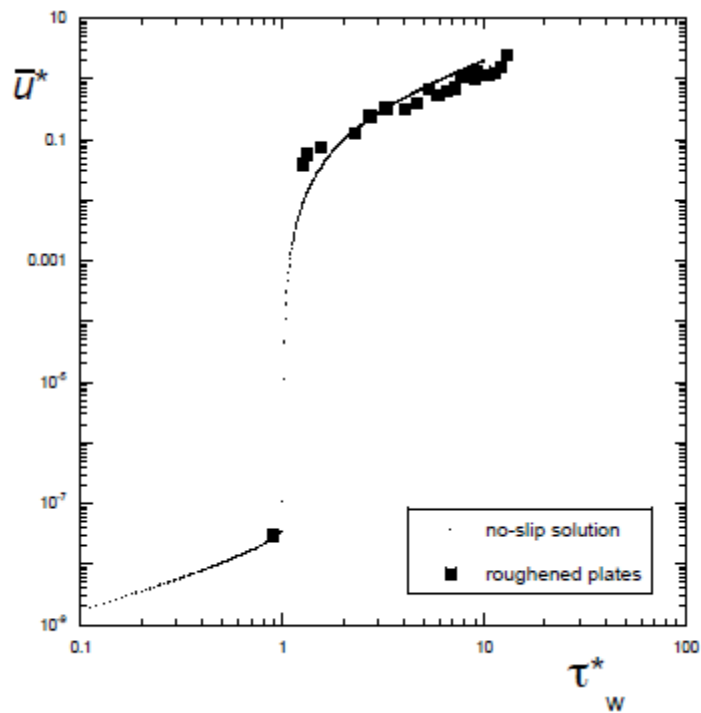


Gráfico 9 – Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Não-deslizamento.

Em seguida realizamos os testes de escoamento da suspensão base óleo, com as placas que apresentavam o mesmo ângulo de contato com o fluido base (óleo), mas com rugosidades diferentes. Esses resultados encontram-se no Gráfico 10.

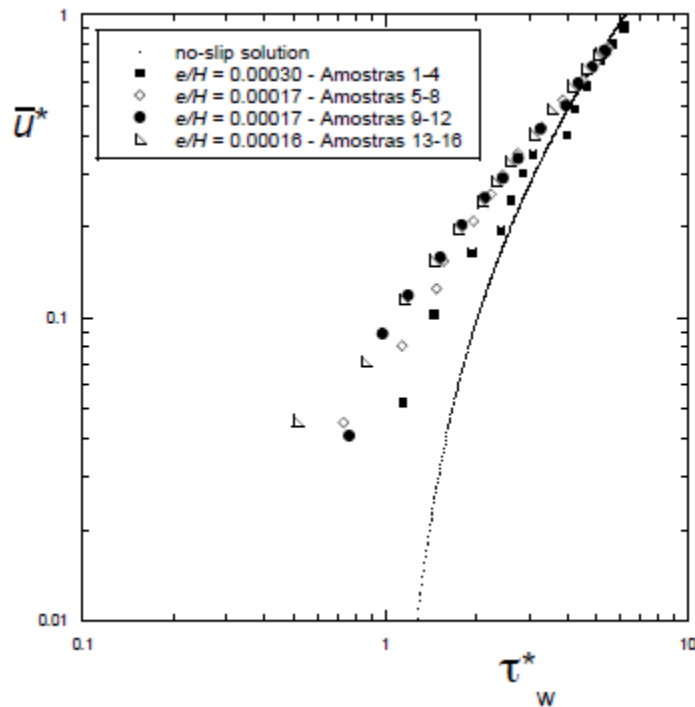


Gráfico 10 – Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito da rugosidade.

Como essas placas foram as mesmas utilizadas nos testes com Carbopol, não esperávamos uma variação significativa do deslizamento aparente nesses testes, visto que as rugosidades dessas placas não variaram de forma significativa. De fato, tendo em vista as incertezas associadas às medidas, observamos diferenças não muito significativas entre os resultados dos testes com as placas de rugosidade relativa igual a 0,00030 e os resultados dos testes das demais placas (com praticamente a mesma rugosidade relativa). O teste com as placas de maior rugosidade relativa (0,00030) apresentou um menor deslizamento quando comparado com os demais, seguindo a tendência observada nos primeiros testes de escoamento e encontrada na literatura.

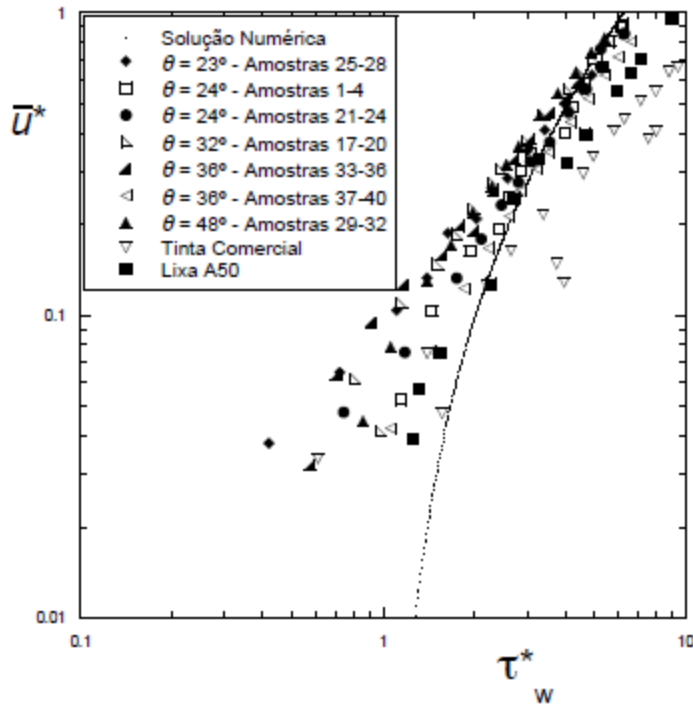


Gráfico 11 – Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do ângulo de contato.

Nos testes realizados com o Carbopol 0,13% a tendência obtida quando fixamos a rugosidade foi tal que quanto maior o ângulo de contato do fluido base com a superfície (o que corresponde a uma menor molhabilidade) menor é o deslizamento aparente. Dessa forma, essa era a tendência esperada para os resultados dos testes realizados com a suspensão à base de óleo. Estes resultados encontram-se no Gráfico 11.

Com esses testes realizados com suspensão base óleo e as diferentes placas, nas quais a rugosidade foi aproximadamente fixada e o ângulo de contato variado não conseguimos observar tendência alguma. Em todas essas placas testadas o deslizamento aparente se manifesta, mas a tendência esperada não pode ser comprovada.

Talvez não tenhamos conseguido ver uma tendência mais clara nesse caso pelo fato de que o ângulo de contato do óleo com essas superfícies não variou de forma significativa, diferentemente do caso anterior (com o Carbopol), no qual o ângulo de contato da água variou através de uma ampla faixa de valores.

Uma outra possibilidade para explicar o fato de não termos conseguido observar uma correlação entre o deslizamento e a molhabilidade seja a natureza do fluido à base de óleo utilizado, que consiste basicamente de um fluido de perfuração composto por partículas sólidas em suspensão. Talvez em alguns casos tenha havido mudança da reologia ao longo dos experimentos, o que também explicaria alguns dos resultados caírem abaixo da curva teórica.

Conclusões

Com relação aos parâmetros que afetam o deslizamento aparente, constatamos que, para um ângulo de contato fixo, um aumento na rugosidade relativa causa uma diminuição no deslizamento aparente. Constatamos também que para uma rugosidade fixa, um aumento do ângulo de contato entre o fluido base que forma o material viscoplástico e a superfície através da qual o material escoar causa uma diminuição do deslizamento aparente. Logo, com base nos testes realizados, quanto maior a molhabilidade, maior é o deslizamento aparente.

Comentários finais

Os resultados obtidos neste projeto mostraram que, através da utilização de revestimentos internos a dutos, é possível obter enormes reduções de perda de carga em escoamentos de materiais viscoplásticos como os petróleos muito viscosos, suspensões diversas, fluidos de perfuração, dentre outros. Os revestimentos têm duas funções principais, a da redução da rugosidade e a do aumento da molhabilidade, ambas com o efeito de causar/aumentar o nível de deslizamento e, conseqüentemente, reduzir a perda de carga. Como o bombeamento de materiais viscoplásticos envolve tipicamente enormes potências de bombeamento, a redução da perda de carga pode reduzir drasticamente os custos operacionais.

Referências

- 1 – de Souza Mendes, P. R., 2007. Dimensionless non-Newtonian fluid mechanics. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 147 (1-2), 109-116.
- 2 – de Souza Mendes, P. R., Dutra, E. S. S., 2004. Viscosity function for yield-stress liquids. *Applied Rheology* 14 (6), 296-302.
- 3 – Seth, J. R., Cloitre, M., Bonnecaze, R. T., 2008. Influence of short-range forces on wall-slip of microgel pastes. *J. Rheol.* 52 (5), 1241-1268.