

**Renata Araujo Barroso
Pereira**

**Efeitos de Revestimentos
Internos em Tubos:
Deposição de Parafinas e
Perda de Carga em Fluidos
Viscoplásticos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro
Agosto de 2009



Renata Araujo Barroso Pereira

**Efeitos de Revestimentos Internos em Tubos:
Deposição de Parafinas e Perda de Carga em
Fluidos Viscoplásticos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Rio de Janeiro
Agosto de 2009



Renata Araujo Barroso Pereira

**Efeitos de Revestimentos Internos em Tubos:
Deposição de Parafinas e Perda de Carga em
Fluidos Viscoplasticos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão examinadora abaixo assinada.

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de Agosto de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Renata Araujo Barroso Pereira

Graduou-se em Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio (Rio de Janeiro, Brasil) em 2006. Atualmente trabalha na PETROBRAS como Engenheira de Equipamentos - Mecânica, na Diretoria de Abastecimento.

Ficha Catalográfica

Pereira, Renata Araujo Barroso

Efeitos de Revestimentos Internos em Tubos: Deposição de Parafinas e Perda de Carga em Fluidos Viscoplásticos / Renata Araujo Barroso Pereira; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes. – 2009.

50 f: il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Deslizamento. 3. Revestimento. 4. Escoamento Interno. I. Souza Mendes, Paulo Roberto de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais.

Agradecimentos

Ao meu orientador Paulo Roberto de Souza Mendes pela oportunidade, pelos ensinamentos e pela ajuda ao longo deste trabalho.

Aos meus pais e à minha irmã pelo amor e apoio incondicional.

Ao Tiago pelo incentivo, compreensão, paciência, carinho e amor em todos os momentos.

Aos amigos do laboratório pela perseverança, incentivo e companheirismo diário.

À Paula que sempre está ao meu lado pronta a me ouvir e me ajudar.

Aos meus avós, tios, primos e amigos pela compreensão nos momentos de ausência.

À Deus.

Aos amigos do AB-RE/EM/QRA pelo apoio necessário à conclusão deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pelos ensinamentos necessários à minha formação.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pelo apoio administrativo.

Ao CNPq, à Capes, à PETROBRAS e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos.

Resumo

Pereira, Renata Araujo Barroso; Souza Mendes, Paulo Roberto de. **Efeitos de Revestimentos Internos em Tubos: Deposição de Parafinas e Perda de Carga em Fluidos Viscoplásticos**. Rio de Janeiro, 2009. 50p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Óleos pesados são significativamente importantes no cenário brasileiro e internacional, sendo sua principal característica a alta viscosidade e consequente dificuldade de transporte. Além disso, durante o escoamento destes óleos ocorre a deposição de parafina nas paredes dos oleodutos, particularmente a baixas temperaturas. Esse tipo de petróleo possui características reológicas viscoplásticas, e sob certas condições ainda não muito bem conhecidas, apresentam o fenômeno do deslizamento aparente ao escoar internamente, tendo o potencial de reduzir substancialmente a perda de carga em um escoamento. Neste trabalho foi investigado experimentalmente o deslizamento aparente que ocorre em escoamentos de materiais viscoplásticos bem como foi determinada a tensão cisalhante necessária para descolar uma quantidade de parafina depositada sobre diferentes revestimentos. Devido a uma evidência experimental de que o grau de deslizamento depende de duas propriedades físicas da superfície interna do duto, foram determinadas também a rugosidade e a molhabilidade destas. Foi construída uma planta experimental na qual era possível variar as placas (diferentes revestimentos e rugosidades) que formavam as paredes do canal pelo qual o fluido era forçado a escoar, de forma a se obter a curva vazão x pressão para cada tipo de revestimento. Estes escoamentos foram simulados numericamente supondo ausência de deslizamento. A comparação entre as curvas experimentais e teóricas fornecem uma quantificação do deslizamento ocorrido nos experimentos. Utilizamos um fluido à base de água e um fluido à base de óleo. Foi observado que o deslizamento aparente, existente em escoamentos de materiais viscoplásticos, se manifesta na faixa de baixas tensões adimensionais e que os revestimentos possuem duas funções principais, a da redução da rugosidade e a do aumento da molhabilidade, ambas com o efeito de aumentar o nível de deslizamento e, conseqüentemente, reduzir a perda de carga, diminuindo os custos operacionais.

Palavras-chave

Deslizamento. Revestimento. Escoamento Interno.

Abstract

Pereira, Renata Araujo Barroso; Souza Mendes, Paulo Roberto de (Advisor). **Effects of Internal Coatings in Tubes: Paraffin Deposition and Head-loss in Viscoplastic Fluids**. Rio de Janeiro, 2009. 50p. MsC Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Heavy oils are significantly important in the Brazilian and international scenario and its particularity is the high viscosity and consequent difficulty of transport. Also, during the flow of these oils occurs the deposition of paraffin on the pipelines walls especially at low temperatures. This type of oil has viscoplastic rheological characteristics, and under certain conditions not yet well understood, exhibits the phenomenon of apparent wall slip during internal flow, with the potential to substantially reduce the head-loss in a flow system. This study investigated experimentally the wall slip that occurs in the flow of viscoplastic liquids. Moreover, it was also determined, the wall shear stresses necessary to unstick an amount of paraffin deposited on different coatings. Due to an experimental evidence, the amount of wall slip seems to depend on two physical properties of the internal surface of the pipeline, therefore it was determined also the roughness and wettability of these. A test section was designed and built. Plates with different coatings and roughness constitute the parallel channel which the fluid was forced through in order to obtain the curves of dimensionless average velocity versus dimensionless wall shear stress. These flows were also numerically solved referring to the case of no wall slip. Comparisons between the experimental and numerical results could quantify the amount of wall slip that occurs in the experiments. We used an aqueous solution and oil dispersion. It was observed that the wall slip, that occurs during the flow of viscoplastic materials, manifests itself in the range of low dimensionless wall shear stress and that the coatings have two main functions, reduction of the roughness and increase of the wettability, both with the effect of increasing the amount of wall slip and thus reduce the head-loss, diminishing operational costs.

Keywords

Wall Slip. Coating. Internal Flow.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Organização do Trabalho	15
1.4	Revisão Bibliográfica	15
2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	20
2.1	Revisão Teórica	20
2.2	Formulação Matemática	21
2.3	Adimensionalização	23
2.4	Resultados da Análise e Solução Numérica	25
3	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	27
3.1	Reologia dos Fluidos	27
3.2	Avaliação do Ângulo de Contato e da Rugosidade	29
3.3	Escoamento entre Placas Paralelas	32
3.4	Medição da Aderência da Parafina	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Escoamento entre Placas Paralelas	37
4.2	Medição da Aderência da Parafina	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	Referências Bibliográficas	49

Lista de figuras

1.1	Deslizamento Aparente (Wall Depletion).	14
2.1	Dimensões do canal de escoamento.	21
2.2	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do n .	25
2.3	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do J .	26
3.1	Curva de escoamento do óleo de Urucu.	28
3.2	Curva de escoamento do óleo de Marlim.	28
3.3	Curva de escoamento da dispersão de Carbopol 0,13%.	29
3.4	Curva de escoamento da suspensão base óleo.	30
3.5	Medição do ângulo de contato com a utilização do goniômetro.	30
3.6	Imagem obtida pelo software utilizado para a medida do ângulo de contato.	31
3.7	Desenho esquemático da planta experimental.	33
3.8	Planta experimental.	34
3.9	Seção de testes com placas inox sem revestimento.	34
3.10	Seção de testes com as placas revestidas.	34
3.11	Tomada de pressão na entrada na placa.	35
3.12	Equipamento para medir a aderência da parafina – Copo e Bob.	36
3.13	Equipamento para medir a aderência da parafina montado no reômetro.	36
4.1	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede. Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.1.	38
4.2	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito da rugosidade. Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.2.	39
4.3	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do ângulo de contato. Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.2.	40
4.4	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.2.	41
4.5	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Não-deslizamento (superfície muito rugosa, lixa 50, fluido à base de óleo).	41
4.6	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito da rugosidade. Fluido à base de óleo. Características das superfícies na Tab. 3.2.	42
4.7	Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do ângulo de contato. Fluido à base de óleo. Características das superfícies na Tab. 3.2.	43

4.8	Tensão de Descolamento de Parafina (Pa) - Primeira remessa de placas sem pré-aquecimento.	45
4.9	Tensão de Descolamento de Parafina (Pa) - Segunda remessa de placas com pré-aquecimento.	46

Lista de tabelas

- | | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Ângulo de contato e rugosidade – Primeira Remessa de Placas. | 32 |
| 3.2 | Ângulo de contato e rugosidade – Segunda Remessa de Placas. | 32 |

Não há lugar para a sabedoria onde não há paciência.

Santo Agostinho.