

Julio Raúl Sierra Vásquez

**Redução de atrito em escoamento laminar por
lubrificação de parede com ranhuras**

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. Márcio da Silveira Carvalho
Co-Orientador: Prof. Luís Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro
Agosto de 2009

Julio Raúl Sierra Vásquez

**Redução de atrito em escoamento laminar por
lubrificação de parede com ranhuras**

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. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. Luís Fernando Alzguir Azevedo

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Dr. Geraldo Spinelli Ribeiro

Petrobrás

Dr. Sidney Stuckenbruck

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 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.

Julio Raúl Sierra Vásquez

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela UCSM (Universidad Católica de Santa Maria) em 2002. Experiência em manutenção de maquinaria pesada, Desenho de Estruturas Metálicas

Ficha Catalográfica

Julio Raúl Sierra Vásquez

Redução de atrito em escoamento laminar por lubrificação de parede com ranhuras / Julio Raúl Sierra Vásquez; orientador: Márcio da Silveira Carvalho; co-orientador: Luís Fernando Alzguir Azevedo. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.

v., 53 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Redução de atrito . 3. Escoamento laminar. 4. Superfícies corrugadas. I. Márcio da Silveira Carvalho. II. Luís Fernando Alzguir Azevedo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Dedico este trabalho a meu pai e a minha família pelo apoio e a meus orientadores pelo ensino dados nestes dois anos.

Agradecimentos

A meu pai e irmãos pela confiança em mim e o apoio dado nestes dois anos.

Ao professor Márcio da Silveira Carvalho e ao professor Luis Fernando Alzuir Azevedo pela orientação neste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio na bolsa de estudos.

Aos membros da banca pela participação e sugestões.

A meus amigos e demais pessoas que me apoiaram neste tempo.

Ao pessoal do grupo de REOLOGIA, pela ajuda dada.

Resumo

Julio Raúl Sierra Vásquez; Márcio da Silveira Carvalho; Luís Fernando Alzuguir Azevedo. **Redução de atrito em escoamento laminar por lubrificação de parede com ranhuras**. Rio de Janeiro, 2009. 53p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Objetivo: Uma parte significativa das reservas mundiais de petróleo é encontrada na forma de óleos pesados. Estes óleos pesados possuem alta viscosidade de 100 - 10000 cP, que torna seu transporte altamente complexo e custoso. Vários métodos foram desenvolvidos para reduzir a perda de carga de escoamentos laminares de óleos de alta viscosidade. Entre os mais utilizados, pode-se citar o bombeio de um fluido de baixa viscosidade perto da parede do tubo com o óleo viscoso sendo transportado no centro, conhecido como "core-annular flow". Neste trabalho, uma alternativa ao core-annular flow é estudada. O método é baseado na utilização de micro ranhuras da parede do duto preenchidas com um líquido de baixa viscosidade. Este método tem o potencial de evitar alguns dos problemas que ocorrem no uso de core-annular flow. A análise do efeito das diferentes propriedades dos fluidos, condições de operação, geometria das ranhuras na perda de carga do escoamento foi feita através de um estudo numérico e experimental. Resultados indicam as limitações e potencialidade do uso de micro ranhuras na redução de perda de carga de escoamento laminar

Palavras-chave

Redução de atrito . Escoamento laminar. Superfícies corrugadas.

Abstract

Julio Raúl Sierra Vásquez; Márcio da Silveira Carvalho; Luís Fernando Alzuguir Azevedo. **Drag reduction in laminar flow by lubrication of grooved walls**. Rio de Janeiro, 2009. 53p. MsC Dissertation — Department of Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Objective: A significant portion of the world oil reserves is found in the form of heavy oil. These oils have a high values of viscosity around 100-10000 cP, that makes their transportation complex and expensive. Several methods have been developed to reduce the pressure drop in laminar flows of high viscosity oils. Among them is the solution of pumping a liquid of lower viscosity near the pipe wall with the high viscosity oil flowing in the center. This method is known as Core-annular flow. In this work, an alternative to core-annular flow is studied. The method is based on the use of micro grooves in the pipe wall filled with a liquid of smaller viscosity. This method has the potential to elude some problems that occur with the core-annular flow method. The analysis of the drag reduction effect as a function of different fluids properties, operational conditions and geometry of the grooved walls was made using a numerical and experimental approach. Results indicate the limitations and potential of using micro grooves for drag reduction in laminar flows of high viscosity fluids.

Keywords

Drag reduction. Laminar Flow. Grooved walls.

Sumário

Sumário das notações	13
1 Introdução	14
1.1 Motivação	14
1.2 Core-annular flow (CAF)	15
1.3 Adição de polímeros	16
1.4 Micro ranhuras	17
2 Análise numérica	19
2.1 Equações de conservação	19
2.2 Solução do escoamento entre placas planas.	19
2.3 Solução do problema com parede deslizantes	20
2.3.1 Resultados	21
2.4 Solução do problema com interface entre o líquido viscoso e o líquido lubrificante nas ranhuras.	23
2.4.1 Condições de contorno da equação de conservação de quantidade de movimento.	23
2.4.2 Condições de contorno de malha	24
2.5 Solução computacional	26
2.5.1 Configuração da malha	26
2.5.2 Resultados da simulação	29
2.5.3 Fator de atrito para placas planas lisas e com ranhuras	35
3 Análise experimental	38
3.1 Dispositivo experimental	38
3.2 Preparação da bancada	41
3.3 Procedimento experimental	42
3.4 Resultados Experimentais	43
3.5 Fator de atrito em placas planas e com ranhuras.	46
3.6 Comparação da simulação numérica com dados experimentais	48
3.7 Teste de longa duração	49
3.8 Teste de reinício do escoamento após parada	50
4 Conclusões e comentários finais	51
Referências Bibliográficas	53

Lista de figuras

1.1	Core Annular Flow Process	15
1.2	Estabilidade bifásica num escoamento CAF [?]	16
1.3	Micro Canais	17
1.4	Ângulo de contato de uma superfície plana e uma com Nanogrelhas [?]	18
2.1	Condição de contorno como uma parede deslizando	20
2.2	Problema com superfícies deslizantes	21
2.3	Relação de vazão com o comprimento da parede deslizando	22
2.4	Distribuição de pressão ao longo do comprimento	22
2.5	Queda de pressão ao longo do comprimento	22
2.6	Linhas de corrente ao longo do comprimento	23
2.7	Problema com interface	24
2.8	Condições de momentum	24
2.9	Condição de contorno de malha	25
2.10	Geometria da malha	26
2.11	Malha com uma superfície corrugada de 1mm	27
2.12	Malha com uma superfície corrugada de H=10mm	28
2.13	Malha com uma superfície corrugada de H e h variável	29
2.14	Contornos de pressão e linhas de corrente numa superfície corrugada de 1mm e uma relação de viscosidades $\mu_1/\mu_2=1$	30
2.15	Contornos de pressão e linhas de corrente numa superfície corrugada de 2mm e uma relação de viscosidades $\mu_1/\mu_2=1$	31
2.16	Relação da vazão com a razão da viscosidade para uma superfície corrugada de $L_0=1$ mm, $L=3$ mm, $h=1$ mm, $\Delta P=10$ Pa, $H=5$ mm.	31
2.17	Relação de vazão Q/Q_0 com o comprimento da parede L_0/L para uma superfície corrugada de $H=5$ mm, com diversas razões de viscosidades	32
2.18	Relação de vazão com razão de viscosidades para uma superfície corrugada de $L_0=1$ mm, $L=3$ mm, $h=1$ mm, $\Delta P=10$ Pa, $H=10$ mm e uma relação de viscosidades $\mu_1/\mu_2=1$	33
2.19	Relação de vazão Q/Q_0 com o comprimento da parede L_0/L para uma superfície corrugada de $H=10$ mm	34
2.20	Ganho na vazão numa superfície corrugada de $L_0=1$ mm, $L=3$ mm, h =variável, $\Delta P=10$ Pa, H =variável, em função da razão de viscosidades	35
2.21	Fator de atrito modulado pelo número de Reynolds para uma superfície corrugada de L_0 = variável, $L=3$ mm, $h=1$ mm, $\Delta P=10$ Pa, $H=5$ mm e μ_1/μ_2 de 1,10 e 100	36
2.22	Fator de atrito modulado pelo número de Reynolds para uma superfície corrugada de L_0 = variável, $L=3$ mm, $h=1$ mm, $\Delta P=10$ Pa, $H=10$ mm e μ_1/μ_2 de 1,10 e 100	37
3.1	Representação gráfica da bancada experimental	38

3.2	Dispositivo de acrílico construído para obter um escoamento entre duas placas paralelas	39
3.3	Placas ranhuras de 1 mm x 1 mm	40
3.4	Placas ranhuras de 0,3 mm x 1 mm	40
3.5	Placas Testadas no Experimento	41
3.6	Bancada experimental	42
3.7	Vista das Placas com ranhuras montadas	43
3.8	Queda de pressão para uma placa plana lisa, teórico e experimental.	44
3.9	Queda de pressão em função da vazão entre duas placas planas com ranhuras de 1 mm de largura, enchidas com um fluido lubrificante.	44
3.10	Interface entre um fluido altamente viscoso e o fluido lubrificante com ranhuras de 1 mm.	45
3.11	Queda de pressão em função da vazão imposta, para glicerina escoando entre duas placas planas e placas com ranhuras de 0,3 mm preenchidas com um fluido lubrificante	45
3.12	Linha de interface entre um líquido de alta viscosidade e o líquido lubrificante	46
3.13	Comparação de $f \times Re$ para placas planas como o valor teórico	48
3.14	Comparação de $f \times Re$ para placas com ranhuras com o valor teórico para placa plana	48
3.15	Comparação experimental e numérica para uma configuração de comprimento de ranhura de $Lo= 0,3$ mm.	49

Lista de tabelas

2.1	Resultados preliminares da simulação (Placas deslizantes)	21
2.2	Superfície corrugada de L_0 variável, $L=3$ mm, $h = 1$ mm, $\Delta P=10$ Pa.	27
2.3	Superfície corrugada de L_0 variável, $L=3$ mm, $h = 1$ mm, $\Delta P=10$ Pa.	28
2.4	Superfície corrugada de $L_0=1$ mm, $L=3$ mm, $h=$ variável, $\Delta P=10$ Pa, $H=$ variável.	29
2.5	Geometria para uma superfície Corrugada de L_0 variável, $L=3$ mm, $h=1$ mm, $\Delta P=10$ Pa, $H=5$ mm.	30
2.6	Geometria para uma superfície corrugada de L_0 variável, $L=3$ mm, $h=1$ mm, $\Delta P=10$ Pa, $H=10$ mm.	33
2.7	Geometria para uma superfície corrugada de $L_0= 1$ mm, $L=3$ mm, $h=$ variável, $\Delta P=10$ Pa, $H=$ variável.	34
3.1	comparação de $f \times Re$ para uma placa plana experimental e teórica	47
3.2	comparação de $f \times Re$ para uma placa plana e uma placa com ranhuras de $Lo=0,3$ mm	47
3.3	Teste de longa duração	50

Un abîme effrayant, une profusion de questions de toutes sortes où ma responsabilité était en jeu se présentaient à moi. Et la plus importante: qu'est-ce qui doit remplacer l'objet manquant? Le danger d'un art ornemental m'apparaissait clairement, la morte existence illusoire des formes stylisées ne pouvait que me rebuter.

C'est seulement après de nombreuses années d'un travail patient, d'une réflexion intense, d'essais nombreux et prudents où je développais toujours plus la capacité de vivre purement, abstraitement les formes picturales et de m'absorber toujours plus profondément dans ces profondeurs insondables, que j'arrivais à ces formes picturales avec lesquelles je travaille aujourd'hui et qui, comme je l'espère et le veux, se développeront bien plus encore.

Il a fallu beaucoup de temps avant que cette question: 'qu'est ce qui doit remplacer l'objet?' trouve en moi une véritable réponse. Souvent je me retourne vers mon passé et je suis désespéré de voir combien de temps il m'a fallu pour arriver à cette solution.

Wassily Kandinsky, *Regards sur le passé.*

Sumário das notações

Símbolos Romanos

A	Comprimento da parede deslizante
D_h	Diâmetro hidráulico
f	Fator de atrito
g	Função de distribuição nodal
H	Altura do canal
h	Altura da ranhura
\bar{I}	Tensor unitário
L	Comprimento da geometria
L_0	Comprimento da ranhura
P	Pressão
P^*	Pressão
Q	Vazão de uma superfície com ranhura
Q_0	Vazão de uma superfície sem ranhura
Re	Número de Reynolds
s	Comprimento de arco ao longo da linha
\bar{T}_i	Tensor das tensões
\vec{v}_i	Vetor velocidade
\vec{V}_W	Vetor velocidade na parede

Símbolos Gregos

ρ_i	Densidade do líquido
μ_1	Viscosidade do líquido 1
μ_2	Viscosidade do líquido 2
β	Coefficiente de deslizamento
σ	Tensão da interface