

Maria Helena Farias

**Convecção Forçada em
Escoamentos Laminares de
Líquidos Viscopoplásticos em
Tubos e Espaços Anulares**

TESE DE DOUTORADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica**

Rio de Janeiro
Setembro de 2004



Maria Helena Farias

**Convecção Forçada em Escoamentos
Laminares de Líquidos Viscoplásticos em
Tubos e Espaços Anulares**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes
Co-Orientador: Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Rio de Janeiro
Setembro de 2004



Maria Helena Farias

**Convecção Forçada em Escoamentos
Laminares de Líquidos Viscoplaísticos em
Tubos e Espaços Anulares**

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

Paulo Roberto de Souza Mendes

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Carlos Valois Maciel Braga

Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Sergio Leal Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Roney Leon Thompson

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Maria Laura Martins Costa

Universidade Federal Fluminense

Rosana Fátima Teixeira Lomba

CENPES/PETROBRAS

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Setembro de 2004

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

Maria Helena Farias

Graduou-se em Engenharia Mecânica na *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro* -PUC-Rio (Rio de Janeiro, Brasil) em 1995. Concluiu o Mestrado na PUC-Rio (Rio de Janeiro, Brasil) em 1997 na área de Engenharia Mecânica - Termociências, estudando o aquecimento de fluidos por microondas.

Ficha Catalográfica

Farias, Maria Helena

Convecção Forçada em Escoamentos Laminares de Líquidos Viscopoplásticos em Tubos e Espaços Anulares/ Maria Helena Farias ; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes; co-orientador: Carlos Valois Maciel Braga. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

134 f. :il.; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Convecção forçada. 3. Líquidos viscopoplásticos. 4. Espaço anular I. Mendes, Paulo Roberto de Souza. II. Braga, Carlos Valois Maciel. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professores Paulo Roberto de Souza Mendes e Carlos Valois Maciel Braga, pelo apoio, paciência, estímulo e simpatia, durante este longo trabalho.

Aos alunos de Iniciação Científica, Guilherme, Tiago e Priscilla, que com muita competência me ajudaram a executar os experimentos.

A todos os meus amigos do Laboratório de Termociências.

Ao Jandir, Lourenço, Eduardo, Tatiana, Suzana, aos Bombeiros e, em especial, ao Deivid, que compartilhou comigo dos piores e melhores momentos da montagem e funcionamento da bancada, sempre agindo com muita criatividade e competência.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, com quem, ao longo de todos os anos em que estive na PUC, sempre me senti bem recebida.

Aos funcionários do ITUC, que muito me ajudaram na elaboração da bancada.

A toda minha família, em especial, Tia Clementina, Tia Zizi (in memoriam), Alessandra, meus irmãos (Geraldo, Alexandre e Luis (in memoriam)), pelo conforto e apoio que me foi dado sempre.

Aos meus pais, pela vida.

Ao meus padrinhos Mary e Paulo Ely (in memoriam), por terem mudado meu destino.

Aos Professores membros da banca examinadora, pela gentileza em participar da banca e por terem contribuído com seus comentários e sugestões.

À falta de espaço nesta página pois, se não fosse esta limitação, eu passaria horas a fio a listar um grande número de pessoas (as quais merecem muito reconhecimento) e que, mesmo de forma inconsciente (algumas), contribuíram para meu enriquecimento pessoal e profissional... não sobraria ao menos uma caneta para colocar o ponto final na lista.

Ao CNPq e CENPES-PETROBRAS

Resumo

Farias, Maria Helena; Mendes, Paulo Roberto de Souza; Braga, Carlos Valois Maciel. **Convecção Forçada em Escoamentos Laminares de Líquidos Viscopoplásticos em Tubos e Espaços Anulares**. Rio de Janeiro, 2004. 134p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Escoamentos de fluidos não Newtonianos são comumente encontrados em processos industriais. Deste modo, é importante conhecer bem o efeito dos processos sobre a reologia desta classe de fluidos, assim como o inverso, ou seja, conhecer o efeito da interferência da reologia de tais fluidos sobre os processos. Fluidos não Newtonianos exibem complexidade no seu comportamento mecânico, não encontrada nos fluidos Newtonianos, como, por exemplo, dependência da viscosidade com a taxa de cisalhamento e a existência de uma tensão-limite de escoamento não nula. Verifica-se, atualmente, a existência de uma ampla lacuna na literatura no que diz respeito à compreensão da interação de fluidos não newtonianos em diferentes geometrias de escoamento, em particular sob o ponto de vista térmico. Algumas geometrias, por serem mais comuns nas linhas industriais, têm recebido maior atenção nas investigações sobre o referido aspecto, como, por exemplo, os casos do tubo circular e do espaço anular. Encontra-se uma maior quantidade de trabalhos publicados de estudos analíticos ou de simulação numérica, enquanto que são raros os artigos baseados em investigações experimentais. No presente trabalho, o qual teve como motivação a avaliação do comportamento térmico de um poço de petróleo durante sua perfuração, estudou-se experimentalmente o efeito da reologia do fluido no processo de transferência de calor em espaços anulares e, também, em tubos. O objetivo foi determinar o coeficiente interno de transferência de calor (Número de Nusselt) para o caso de parede interna com fluxo de calor uniforme e parede externa adiabática para o anular e fluxo de calor uniforme para o tubo. Utilizou-se um fluido do tipo viscopoplástico, que reproduz bem o comportamento do fluido de perfuração, em diferentes

concentrações, no intuito de se observar a influência da reologia do fluido no escoamento não isotérmico. Diferentes razões de raios do espaço anular foram estudadas. Os resultados experimentais mostram que, em escoamentos laminares e completamente desenvolvidos, a reologia do fluido não afeta a transferência de calor no espaço anular, sendo esta, fundamentalmente, dependente da geometria. Estes resultados estão de acordo com previsões teóricas recentemente publicadas, e a principal contribuição do presente trabalho é confirmar este resultado surpreendente, que torna mais simples os projetos envolvendo o escoamento de materiais viscoplásticos em espaços anulares sob as condições de contorno investigadas.

Palavras-chave

Convecção Forçada, Líquidos Viscopelásticos, Espaço Anular.

Abstract

Farias, Maria Helena; Mendes, Paulo Roberto de Souza; Braga, Carlos Valois Maciel. **Forced Convection in Laminar Flows of Viscoplastic Liquids Through Tubes and Annuli**. Rio de Janeiro, 2004. 134p. DSc Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Non-Newtonian fluids flow are very common in industrial processes, so it is important to know both the effect of the process on the fluid and vice-versa. Non-Newtonian Fluids exhibit complex mechanical behavior not found in Newtonian fluids, such as shear-rate-dependent viscosity and non-zero Yield stress. Nowadays there is a lack of understanding in the literature of the interaction among non-Newtonian fluids and different flow geometries, particularly as far as heat transfer is concerned. Some geometries are found more frequently in industrial processes, being, accordingly, a more frequent subject of research. Among these are the tubes and annuli. Most of the published articles about this subject are analytical studies or numerical simulations, while those based on experimental investigations are rather scarce. This work is focused in the evaluation of the thermal behavior of oil wells during the flow of the drilling fluid. The effect of fluid rheology on heat transfer in annular spaces and circular tubes was investigated experimentally. The purpose was to determine the convective heat transfer coefficient (Nusselt number). The boundary conditions for the annuli were uniform heat flux at the inner wall and adiabatic outer wall, while, for the tube, the heat flux at the wall was kept constant and uniform. To mimic the drilling fluid mechanical behavior, the working fluids were viscoplastic liquids at different concentrations. For the annuli, different radius ratios were studied. The experimental results showed that, for laminar and fully developed flow in the annuli, the fluid rheology does not affect the Nusselt number, which is governed by the radius ratio only. These results are in agreement with recently published theoretical predictions, and the main contribution of this work is to confirm this surprising result, which renders simpler the projects involving non-Newtonian fluids flowing in annuli under the thermal boundary conditions investigated.

Keywords

Forced Convection, Viscoplastic Liquids, Annuli.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Generalidades	18
1.2	Motivação	19
1.3	Objetivos da Pesquisa	20
2	Revisão Bibliográfica	21
2.1	Escoamento em Tubo	21
2.2	Escoamento em Espaço Anular	23
3	Análise Teórica	27
3.1	Balanço de Energia	27
3.2	Balanço de Quantidade de Movimento	29
4	Projeto do Simulador Térmico	33
4.1	Modelo para o Simulador	33
4.2	Escoamento em Espaço Anular	34
4.2.1	Regime Laminar	34
4.2.2	Regime Turbulento	36
4.2.3	Seleção dos Tubos para o Espaço Anular	37
4.3	Escoamento em Tubo	39
4.4	Materiais e Componentes da Bancada	39
4.5	Detalhamento do Simulador	40
4.5.1	Circuito Hidráulico	40
4.5.2	Bomba Hidráulica e Controle de Vazão	40
4.5.3	Reservatório de Fluido	41
4.5.4	Medida de Vazão	41
4.5.5	Fonte de Potência	44
4.5.6	Termopares da Superfície dos Tubos	44
4.5.7	Seção de Teste	47
5	Procedimento Experimental	50
6	Tratamento dos Dados	52
6.1	Propriedades Físicas	52
6.1.1	Viscosidade	52
6.1.2	Condutividade Térmica	58
6.1.3	Densidade	59
6.2	Determinação dos Coeficientes Convectivos	59
6.2.1	Escoamento em Espaço Anular	59
6.2.2	Escoamento em tubos	60
6.3	Avaliação das Incertezas	61
6.3.1	Incetezas das Variáveis Básicas	62
6.3.2	Coeficientes de Sensibilidade e Incertezas Propagadas	62

7	Confiabilidade do Simulador Térmico	67
7.1	Testes de Confiabilidade da Bancada Experimental	67
7.1.1	Verificação da Bancada para Testes em Tubo	67
7.1.2	Verificação da Bancada para Testes em Espaço Anular	71
8	Resultados	74
8.1	Escoamento em Tubo	75
8.2	Escoamento em Espaço anular	82
9	Conclusão e Recomendações para Trabalhos Futuros	101
10	Lições Aprendidas	103
	Referências Bibliográficas	106
A	Apêndice	111
A.1	Evolução das Temperaturas ao Longo do Tempo nos Testes em Espaços Anulares	111
B	Apêndice	131
B.1	Curvas de Caracterização dos Fluidos	131

Lista de Figuras

4.1	trocador de calor	33
4.2	Serpentina do interior do reservatório	42
4.3	Suporte interno do reservatório	42
4.4	Medidores de vazão	44
4.5	Termopares soldados na chapa de aço inox, que estava submetida a um curto circuito	45
4.6	Termopar apoiado na chapa	46
4.7	Bancada para testar termopares da chapa sob curto circuito	47
4.8	Bancada para verificação dos termopares no tubo sob curto circuito	47
4.9	Esquema da instalação dos termopares no tubo interno do anular	49
5.1	Esquema do circuito hidráulico	50
5.2	Circuito hidráulico e seus equipamentos	50
6.1	Caracterização de solução aquosa de Carbopol 646 à 25°C, concentração 0,12%. Rampa de torque logarítmica e contínua, de 1000 a 20000 μNm	55
6.2	Variação da viscosidade com a temperatura - solução aquosa de carbopol com concentração 0,12%	56
6.3	Variação da viscosidade com a temperatura - solução aquosa de carbopol com concentração 0,092%	57
7.1	Evolução da temperatura com o tempo	70
7.2	Circuito hidráulico e seções de testes. Primeira concepção da bancada	72
7.3	Seção anular com câmera plena	73
8.1	fluxo de calor: 4575 W/m^2	79
8.2	fluxo de calor: 16761 W/m^2	79
8.3	fluxo de calor: 6300 W/m^2	80
8.4	Comparação para várias medições	89
8.5	Comparação para $n=0,78$	89
8.6	Comparação para diferentes n 's	90
8.7	Comparação para $n=0,4$	90
8.8	fluxo de calor: 3025 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,33$	92
8.9	fluxo de calor: 2953 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,58$	92
8.10	fluxo de calor: 1192 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,69$	93
8.11	fluxo de calor: 2948 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,69$	93
8.12	fluxo de calor: 693 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,33$	94
8.13	fluxo de calor: 3008 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,58$	94
8.14	1185 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,69$	95
8.15	2963 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,69$	95
A.1	fluxo de calor: 202,18 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,33$	112
A.2	fluxo de calor: 202 W/m^2 , $R_i/R_o = 0,33$	112

A.3	fluxo de calor: $697 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	113
A.4	fluxo de calor: $1184 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	113
A.5	fluxo de calor: $1649 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	114
A.6	fluxo de calor: $2181 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	114
A.7	fluxo de calor: $3059 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	115
A.8	fluxo de calor: $199 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	115
A.9	fluxo de calor: $1938 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	116
A.10	fluxo de calor: $3024 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,33$	116
A.11	fluxo de calor: $1192 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,58$	117
A.12	fluxo de calor: $1192 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,58$	118
A.13	fluxo de calor: $3008 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,58$	118
A.14	fluxo de calor: $1161 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,58$	119
A.15	fluxo de calor: $1192 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,58$	120
A.16	fluxo de calor: $2929 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,58$	120
A.17	fluxo de calor: $3008 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,58$	121
A.18	fluxo de calor: $2939 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	122
A.19	fluxo de calor: $1164 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	123
A.20	fluxo de calor: $2992 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	124
A.21	fluxo de calor: $3028 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	125
A.22	fluxo de calor: $1194 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	126
A.23	fluxo de calor: $3013 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	126
A.24	fluxo de calor: $2989 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	127
A.25	$1139 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	128
A.26	$2974 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	128
A.27	$1145 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	129
A.28	$1150 \text{ W/m}^2, R_i/R_o = 0,69$	130
B.1	$\tau_0 = 1,54 \text{ Pa}, K=1,8 \text{ Pa.s}, n=0,42$	132
B.2	$\tau_0 = 0,85 \text{ Pa}, K=1,22 \text{ Pa.s}, n=0,45$	132
B.3	$\tau_0 = 0,5 \text{ Pa}, K=0,92 \text{ Pa.s}, n=0,48$	133
B.4	$\tau_0 = 2,6 \text{ Pa}, K=3,6 \text{ Pa.s}, n=0,40$	133
B.5	$\tau_0 = 0,46 \text{ Pa}, K=1,9 \text{ Pa.s}, n=0,42$	134
B.6	$\tau_0 = 0,011 \text{ Pa}, K=0,058 \text{ Pa.s}, n=0,78$	134

Lista de Tabelas

6.1	Incertezas estimadas	65
6.2	Incertezas combinadas para várias faixas de vazão	66
7.1	Resultados do teste do escoamento de água em tubo	70
8.1	Teste com solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,12 %, com NaOH a 0,054%, pH=7	76
8.2	Teste com solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,12 %, com NaOH a 0,054%, pH=7	77
8.3	Teste com solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,092%, com NaOH a 0,042%, pH=7	78
8.4	Comparação entre Nu experimentalmente determinado e o Nu segundo correlação da literatura	81
8.5	Solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,12% , com NaOH a 0,054%, pH=7	83
8.6	Solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,12% , com NaOH a 0,054%, pH=7	84
8.7	Solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,12% , com NaOH a 0,054%, pH=7	85
8.8	Solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,092% , com NaOH a 0,042%, pH=7	86
8.9	Solução aquosa de carbopol, concentração mássica 0,06% , com NaOH a 0,027%, pH=7	87
8.10	Comparação entre o Nu obtido em investigações teóricas e a média dos Nu 's obtidos experimentalmente, para cada razão de raios estudada no presente trabalho	88

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

A área de troca de calor entre os fluidos no trocador (m^2)

A_s área superficial (m^2)

A_{s_e} área superficial do tubo externo do anular (m^2)

A_{s_i} área superficial do tubo interno do anular (m^2)

A_{s_r} área superficial do tubo num raio genérico (m^2)

A_o área de troca de calor entre o fluido no anular e o fluido que mantém a temperatura da parede uniforme (m^2)

A_t área da seção transversal ao escoamento (m^2)

Br número de Brinkman

c_p calor específico ($J/kg.K$)

D diâmetro interno do Tubo (m)

D_H diâmetro hidráulico (m)

D_i diâmetro interno do espaço anular (m)

D_o diâmetro externo do espaço anular (m)

h coeficiente convectivo (W/m^2K)

h_i coeficiente convectivo de troca de calor na parede interna do anular (W/m^2K)

h_o coeficiente convectivo de troca de calor na parede externa do anular ($W/m^2 K$)

I Corrente elétrica (A)

k condutividade térmica ($W/m.K$)

K índice de consistência ($Pa.s^n$)

L_d comprimento de desenvolvimento (m)

\dot{m} vazão mássica (kg/s)

n índice power law ou índice de comportamento

Nu número de Nusselt

Pe número de Peclet

q potência total gerada (W)

P Perímetro

p pressão (Pa)

q'' fluxo de calor (W/m^2)

q_w'' fluxo de calor na parede (W/m^2)

q_{w_i}'' fluxo de calor na parede interna do anular (W/m^2)

R raio externo (m)

Re número de Reynolds

R_H raio hidráulico

r coordenada radial (m)

r_a raio interno do tubo do trocador de calor do tipo casco e tubo (m)

r_i raio externo do tubo interno da geometria anular (m)
(raio interno, no tubo no anular)

r_o raio interno do tubo externo da geometria anular (m)

r_w raio do casco do trocador de calor (m)

R' razão de raios

r' raio adimensional

T temperatura ($^{\circ}C$)

T' temperatura adimensional

T_b temperatura de *bulk* ($^{\circ}C$)

T_{b_e} temperatura de *bulk* na entrada da geometria de escoamento ($^{\circ}C$)

T_{b_s} temperatura de *bulk* na saída da geometria de escoamento ($^{\circ}C$)

T_{b_z} temperatura de *bulk* numa posição axial do escoamento ($^{\circ}C$)

T_w temperatura da parede ($^{\circ}C$)

T_{f_e} temperatura de entrada do fluido frio ($^{\circ}C$)

T_{f_s} temperatura de saída do fluido frio ($^{\circ}C$)

T_{q_e} temperatura de entrada do fluido quente ($^{\circ}C$)

T_{q_s} temperatura de saída do fluido quente ($^{\circ}C$)

T_{w_e} temperatura na parede do tubo externo do anular($^{\circ}C$)

T_{w_i} temperatura na parede do tubo interno do anular

z coordenada axial

z' coordenada axial adimensional

v_z velocidade na direção axial

\bar{v} velocidade média

v' velocidade adimensional

$\overline{v'}$ velocidade média adimensional

V diferença de potencial

Símbolos Gregos

$\dot{\gamma}$ taxa de deformação (1/s)

$\dot{\gamma}_c$ taxa de deformação característica (1/s)

$\dot{\gamma}'$ taxa de deformação adimensional

Δ variação de uma grandeza

η função viscosidade (Pa.s)

η_c viscosidade característica (Pa.s)

η_0 viscosidade quando $\tau < \tau_0$ (Pa.s)

η' função viscosidade adimensional

ρ densidade (kg/m^3)

μ viscosidade newtoniana (Pa.s)

μ_p viscosidade plástica, do modelo do Plástico de Bingham (Pa.s)

τ' tensão cisalhante adimensional

τ tensão cisalhante (Pa)

τ_0 tensão mínima de escoamento do fluido (Pa)