

**Andrés Gaona Sierra**

**Reinício de escoamento de  
materiais viscoplásticos em um tubo**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia  
Mecânica

Rio de Janeiro  
Julho de 2011

**Andrés Gaona Sierra**

**Reinício de escoamento de materiais  
viscoplásticos em um tubo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obter o 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  
Julho de 2011

**Andrés Gaona Sierra**

**Reinício de escoamento de materiais  
viscoplásticos em um tubo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obter o 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. Márcio da Silveira Carvalho**

PUC-Rio

**Prof. Mônica Feijó Naccache**

PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de Julho de 2011

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

**Andrés Gaona Sierra**

Graduou-se em Engenharia Mecânica Universidade Distrital Francisco José de Caldas, em Bogotá-Colombia em 2007.

Ficha Catalográfica

Gaona, Andres Sierra

Reinício de escoamento de materiais viscoplásticos em um tubo / Andrés Gaona Sierra; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

v., 92 f: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referencias bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Materiais viscoplásticos. 3. Reinício. 4. óleo parafínico. 5. Reologia. I. Souza Mendes, Paulo Roberto de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 510

A mis padres,  
todos sus sacrificios, derrotas y victorias se convirtieron en enseñanzas para mi  
vida.

## Agradecimentos

Ao meu orientador Paulo Roberto de Souza Mendes pelo apoio, ensinamentos e incentivo para a realização deste trabalho.

À Priscilla Varges, a co-orientadora deste trabalho, por sua ajuda, ensinamentos e por sua infinita amabilidade.

À Capes é a PUC-Rio pelo auxílios concebidos sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Sérgio e o Morão pelo apoio técnico no projeto.

Ao Grupo de Reologia da PUC-Rio, em especial à Bruna, pela ajuda, paciência e simpatia.

A meus amigos do Peru, em especial ao José, ao Marquito e o Gerardo, os quais fizeram mas fácil a vida longe da minha terra.

Aos meus pais, minha eterna admiração e agradecimento pela luta diária. Além pela compressão, amor, conselhos e apoio, que me impediram abandonar meu sono. A minha namorada Marcela por sua compreensão, amor e por me esperar durante este longo tempo. A minha irmã Aura, e minha sobrinha Alejandra pelo apoio, amor e as piadinhas incomparáveis.

## Resumo

Gaona, Andres Sierra; Souza Mendes, Paulo Roberto de. **Reinício de escoamento de materiais viscoplásticos em um tubo**. Rio de Janeiro, 2011. 92p. Dissertao de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais problemas no funcionamento de oleodutos submarinos que transportam óleos parafínicos é o reinício do escoamento depois de longas paradas na produção. Durante o percurso desde o reservatório até a plataforma, o óleo (que sai a elevadas temperaturas), é submetido a uma queda brusca de temperatura em função da troca de calor com o leito do mar. Este fenômeno é acelerado em paradas de produção. O resfriamento faz com que as moléculas de parafina se precipitem, formando um gel que pode bloquear totalmente a linha. Nestas condições, para o reinício do escoamento pode ser necessária uma pressão bem maior do que a pressão de funcionamento normal do duto. Assim, é fundamental o conhecimento da pressão mínima necessária ao reinício do escoamento, para permitir a determinação da potência das bombas do oleoduto. Sabe-se da literatura que o comportamento viscoplástico é a principal característica reológica do óleo parafínico a baixa temperatura. Neste trabalho estudamos o reinício de escoamento utilizando um material viscoplástico ideal, a saber, soluções aquosas de Carbopol. As soluções de Carbopol foram caracterizadas reologicamente, e as curvas de escoamento medidas foram ajustadas utilizando a função viscosidade de Herschel-Bulkley. Testes preliminares de validação acusaram a presença de deslizamento na parede do tubo (inicialmente de aço inox), o que levou à troca para um tubo de resina poliéster com a parede interna roscada. Testes de validação com um óleo newtoniano mostraram excelente concordância com a solução analítica (Hagen-Poiseuille). Resultados numéricos foram obtidos usando as funções viscosidade determinadas nos testes de reometria, e confrontados com os resultados experimentais obtidos com as soluções de Carbopol.

## Palavras-chave

Materiais viscoplásticos; Reinício; óleo parafínico; Reologia;

## Abstract

Gaona, Andres Sierra; Souza Mendes, Paulo Roberto de (Advisor).  
**Restartability of viscoplastic materials in pipes**. Rio de Janeiro, 2011. 92p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the main problems in the operation of subsea pipelines that convey paraffin oils is the flow startup after long stoppages. Along the path from the reservoir to the platform, the oil experiences significant heat losses, especially to the low-temperature water at the sea bottom. When there is no flow, the oil may reach very low temperatures. Cooling induces wax precipitation and hence gelification of the oil, which may cause blockage of the pipeline. Under these circumstances, pressures much higher than the usual ones may be needed to cause the flow to restart. The knowledge of the minimum pressure level that causes flow after prolonged stoppages is an important piece of information that is needed in the specification of the pipeline pumps. It is known from the literature that the viscoplastic behavior is the main rheological characteristic of gelled oils. In this work we analyzed the flow startup using an ideal viscoplastic material, namely, aqueous Carbopol solutions. These solutions were rheologically characterized, and the measured flow curves were fitted to the Herschel-Bulkley rheological function. Preliminary validation tests unveiled the presence of wall slip at the stainless steel tube wall. For this reason, a different tube was employed, whose material was a polyester resin and whose inner tube wall was roughened. Validation test results for a Newtonian oil were in excellent agreement with the analytical solution (Hagen-Poiseuille). Numerical results were obtained using the viscosity functions determined from the rheological measurements, and confronted with the experimental results for the Carbopol solutions.

## Keywords

Viscoplastic materials; Restart; Waxy crude oil; Rheology;

# Sumário

1	Introducao	<b>13</b>
1.1	Motivação	13
1.2	Revisão bibliográfica	16
1.3	Objetivos	27
2	Formulação do Problema	<b>28</b>
2.1	Revisão Teórica	28
2.2	Formulação Matemática	32
2.3	Análise Adimensional	39
3	Metodologia Experimental	<b>42</b>
3.1	Montagem experimental	43
3.2	Validação da Bancada	49
3.3	Testes finais	56
4	Resultados	<b>58</b>
4.1	Teste com óleo Lubrax GL5 Sae 140	58
4.2	Teste com óleo Lubrax MO ISO 3200 e Carbopol 0.1	59
4.3	Teste com óleo Lubrax MO ISO 3200 e Carbopol 0,15	67
5	Considerações Finais	<b>72</b>
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	73
	Referências Bibliográficas	<b>74</b>
A	Anexo A	<b>78</b>
A.1	Primeira bancada experimental	78
A.2	Validações das serpentinas	78
B	Anexo B	<b>82</b>
B.1	Aumento da rugosidade do tubo	82
C	Anexo C	<b>86</b>
C.1	Bancada desenhada	86
D	Anexo D	<b>89</b>
D.1	Cálculo de Incertezas de Medição	89

## Lista de figuras

1.1	Incremento da Exploração e Exploração de Poços de Petróleo em Águas Profundas e Ultraprofundas (fonte:Offshore Magazine).	14
1.2	Instalação de Produção Típica-Poço Satélite.	15
1.3	Perfil de Pressões Durante o Bloqueio da Linha (29)	18
1.4	Processo de Escoamento de óleo Parafínico.(11)	21
1.5	Efeito da Temperatura sobre o óleo Parafínico (13).	23
1.6	Mecanismos de Falhas na Quebra do Gel Parafínico (24).	24
1.7	Pressão de Reinício obtida com o Modelo de Tubulação e o Reômetro de Tensão Controlada (24).	25
2.1	Movimento relativo de dois planos paralelos com velocidade constante U, separados por um filme de fluido viscoso com espessura y	28
2.2	Reograma de Diferentes Fluidos	30
2.3	Deslizamento Aparente ( <i>Wall Depletion</i> ).	31
2.4	Balaço de forças	33
2.5	Geometria e parâmetro do fluxo laminar em tubos.	38
2.6	Funções da taxa de cisalhamento e viscosidade em equilíbrio (18)	38
3.1	Foto Bancada Experimental	42
3.2	Desenho esquemático da planta experimental	43
3.3	Contenedores	44
3.4	Tubo fabricado com resina polyester.	45
3.5	Montagem tubo PVCP, tampas e barra roscada	45
3.6	Montagem união de seções de tubo	46
3.7	Conexão de extremos do tubo de resina.	47
3.8	Calibração Transdutor de Pressão.	48
3.9	Opções operação válvula ITV	49
3.10	Validação bancada experimental com equação de Hagen-Poiseuille	51
3.11	Curva de escoamento de Carboplo 0.1%	52
3.12	Validação com Carbopol 0,1%.	53
3.13	Curva de escoamento de Carboplo 0.1% amostra 2	54
3.14	Validação com Carbopol 0,1% amostra 2.	55
3.15	Visualização interfase Carbopol-óleo no tubo de resina	57
4.1	Formação de <i>finger</i> na interface Carbopol-óleo.	59
4.2	Viscosidade óleo Lubrax MO3200 diluído com querosene a 25°C.	60
4.3	Interface formada na magueira antes da entrada ao tubo de resina.	60
4.4	Inteface formada no tubo de resina.	61
4.5	Comportamento pressões no reinício de deslocamento.	62
4.6	Queda de pressão ao longo do tubo e vazão.	63
4.7	Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,01Bar/s$ .	64
4.8	Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,001Bar/s$ .	65
4.9	Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,05Bar/s$ .	68
4.10	Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,01Bar/s$ .	69

4.11 Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,001Bar/s$ .	70
A.1 Foto da planta experimental	78
A.2 localização da serpentina no banho e toma de pressão	79
A.3 Validação através da equação Hagen-Poiseuille	79
A.4 Serpentina em aço inoxidável	80
A.5 Validação equação Hagen-Poiseuille	80
A.6 Validação deslizamento	81
B.1 Areia colada	82
B.2 Resina rachada	85
B.3 Seção de tubo de resina	85
C.1 Usinado de ranuras na face dos raios	86
C.2 União dos perfis quadrados.	87
C.3 papel hidráulico	87
C.4 Cantoneiras para fixar as seções do tubo.	87
C.5 Peça na entrada e saída do tubo e conexão $Tê$	88

## Lista de tabelas

3.1	Valores das variáveis iniciais.	46
3.2	Propriedades Físicas Óleo Lubrax GL5-140 ( $25^{\circ}C$ )	50
4.1	Parâmetros reológicos do Carbopol 0,1 %	58
4.2	Viscosidade óleo Lubrax MO3200	60
4.3	Características do Carbopol 0,1% e Lubrax MO3200 em $21^{\circ}C$	62
4.4	Parâmetros reológicos do Carbopol 0,1 amostra B%	62
4.5	Resultados de testes realizados com $\theta = 0.01, 0.001$ e $0.001$ mudando a localização da interface	66
4.6	Parâmetros reológicos do Carbopol 0,15 %	67
4.7	Resultados de testes realizados com $\theta = 0.05, 0.01$ e $0.001$	71
B.1	Rugosidade obtida com ácido oxálico	83
B.2	Rugosidade obtida com ácido oxálico	84

*La sencillez en todas las cosas aclara y facilita  
la ejecución.*

**Antônio Nariño, .**