

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

EDUARDO MARTINEZ BARREIRA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO REINÍCIO DO ESCOAMENTO DE  
PETRÓLEO PARAFÍNICO GELIFICADO EM TUBULAÇÕES  
PROVIDAS DE ALIVIADORES DE PRESSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(Tcc 2)

CURITIBA

2014

EDUARDO MARTINEZ BARREIRA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO REINÍCIO DO ESCOAMENTO DE  
PETRÓLEO PARAFÍNICO GELIFICADO EM TUBULAÇÕES  
PROVIDAS DE ALIVIADORES DE PRESSÃO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão,  
PhD

CURITIBA

2014

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Simulação Numérica do Reinício do Escoamento de Petróleo Parafínico Gelificado em Tubulações Providas de Aliviadores de Pressão", realizado pelo aluno Eduardo Martinez Barreira, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Ph.D. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão  
Damec, UTFPR  
Orientador

Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco  
Damec, UTFPR  
Avaliador

Prof. MSc. Raul Henrique Erthal  
Damec, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 07 de agosto de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Aurora, João, e Regina, por apoiarem incondicionalmente minhas escolhas acadêmicas e profissionais, e por prover incomparável suporte aos mais variados desafios.

Ao meu irmão Rodrigo, minha namorada Eleanor, e amigos Leandro, Adalberto, Seiji, Daniel, Francisco, Thiago, Rubens, Matthew e vários outros, por seu companheirismo, amizade e carinho. Devo a vocês minha sanidade, tão necessária para obter minhas conquistas. Inclusive, são vocês que fazem tudo valer a pena.

Aos meus mestres, com destaque para Cesar Negrão e Fabio Martins. Ambos os senhores são raros exemplos de pessoas que não se contentam em fazer o mínimo necessário. Pessoas que não falham em apoiar a seus alunos sempre que possível, dentro e fora da academia.

À minha universidade, que serviu como endereço fixo nos últimos cinco anos e meio à minha existência nômade. E fez por mim o que faz melhor, extinguir-me a capacidade de discernir o que é fácil do que é difícil.

Aos órgãos públicos da Capes e do CNPq, pelos incentivos dados a minha formação acadêmica, inicialmente pela bolsa de iniciação científica para pesquisa em Refrigeração em 2010-2012; e secundariamente pela oportunidade de intercâmbio em 2012-2013. Nada pôde argumentar melhor a favor da qualidade de ensino da UTFPR do que estudar fora do país e constatar que estamos, sem dúvida, ao menos em questão de demanda acadêmica, no nível das melhores do mundo.

*“That is the secret of happiness and virtue  
– liking what you’ve got to do. All  
conditioning aims at that: Making people  
like their unescapable social destiny”*

*Director, fictitious character by Aldous  
Huxley in Brave New World.*

“Este é o segredo da virtude e da  
felicidade – gostar do que você tem de  
fazer. Todo condicionamento tem esse  
fim: Fazer as pessoas amarem seu  
inescapável destino social.”

Diretor, personagem fictício de Aldous  
Huxley em Admirável Mundo Novo.

BARREIRA, Eduardo Martinez. **Simulação Numérica do Reinício do Escoamento de Petróleo Parafínico Gelificado em Tubulações Providas de Aliviadores de Pressão**, 2014. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Graduação em Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 96 p.

## RESUMO

O petróleo da camada Pré-sal comumente apresenta composição parafínica, o que resulta em sua gelificação a baixas temperaturas. Visando paradas de produção, foi definido como o objetivo do trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta que avalie pressões e vazões no reinício do escoamento de óleo gelificado, em tubulações providas de aliviadores de pressão. Os aliviadores são empregados por reduzir picos de pressão, porém atrasando a estabilização do escoamento. Dois tipos de aliviadores foram idealizados, um provido de um êmbolo, que recebe e retorna fluido à tubulação; e outro com uma resistência hidráulica fixa, que somente recebe o óleo. Fez-se uso de um modelo matemático para a tixotropia, com base em uma analogia mecânica, presente na literatura. A ferramenta foi então empregada para simular o reinício do escoamento com duas condições de contorno na entrada da tubulação, de pressão ou vazão constante. Para a condição de pressão fixa na entrada, aumentos máximos para o tempo de estabilização do escoamento, de ~5% para ambos tipos de aliviadores, foram registrados quando utilizados dois aliviadores, com volume total igual a 1% do volume da tubulação. Para o caso de vazão fixa, os aliviadores resistivos desempenharam melhor, com 56,3% de redução para o pico de pressão (24,3% para o caso de êmbolo), porém apresentando 104,7% de aumento máximo para o tempo de estabilização (44,3% para o caso de êmbolo), quando até dois aliviadores de mesmo volume total de 1% foram empregados.

**Palavras-chave:** Simulação numérica, gelificação, reinício de escoamento, Pré-sal, óleo parafínico.

BARREIRA, Eduardo Martinez. **Numerical Simulation of Gellified Paraffinic Oil Flow Restart in Tubes Provided with Pressure Release Reservoirs**, 2014. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Graduação em Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 96 p.

## ABSTRACT

Pre-salt layer oil commonly presents a paraffinic composition, resulting on its gellification for low temperatures. With production stops in mind, the development of a tool to evaluate pressure and volumetric flow during flow restart of gelified oil, in tubes provided with pressure release reservoirs, was set as the paper's objective. The pressure release reservoirs are employed in order to reduce pressure peaks, although they delay the flow estabilization. Two types of pressure release reservoirs were idealized, one provided with an embolus, that both receives and returns fluid to the tube; and another with a fixed hydraulic resistance, that only receives the oil. A mathematical model for thixotropy, available in the literature, that uses a mechanical analogy was employed. The tool was then used to simulate the flow restart with two different boundary conditions for the tube's entrance, of fixed pressure or volumetric flow. For the fixed pressure condition, maximum increases in estabilization time, of ~5% for both types of reservoirs, were registered for two reservoirs with total volume equal to 1% of the tube's volume were introduced. For the fixed volumetric flow case, the resistive reservoirs performed better, with 56,3% reduction for the pressure peak (24,3% for the embolus case), although presenting a 104,7% maximum rise in estabilization time (44,3% for the embolus case), when up to two reservoirs of the same total volume of 1% were employed.

**Key-words:** Numerical simulation, gellification, flow restart, Pre-salt, paraffinic oil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Infográfico de diferentes profundidades para poços marítimos de petróleo (Petrobras, 2009). .....	16
Figura 2. Exemplo de aliviador de pressão. Autoria própria .....	17
Figura 3. Volume de fluido a ser desestruturado inicialmente (cartilhado), para tubulação (a) sem e (b) com aliviador de pressão em $z^*$ .....	18
Figura 4. Analogia mecânica massa-mola para o modelo de tixotropia. (Souza Mendes e Thompson, 2013) .....	26
Figura 5. Desenho do problema físico e condições de contorno.....	29
Figura 6. Desenho do aliviador de pressão do tipo êmbolo. ....	34
Figura 7. Desenho do aliviador de pressão do tipo resistivo. ....	35
Figura 8. Campo $z-t$ para a resolução através do Método das Características. ....	38
Figura 9. Ilustração do método da secante para estimar valores para $\tau$ em função do resíduo. ....	43
Figura 10. Algoritmo lógico para o procedimento de cálculo do modelo numérico....	44
Figura 11. Comparação de (a) pressão e (b) vazão para a simulação com o método das características e a solução analítica, com pressão fixa na entrada.....	49
Figura 12. Comparação de (a) pressão e (b) vazão para a simulação com o método das características e a solução analítica, com vazão fixa na entrada.....	51
Figura 13. Efeito da quantidade $n_i$ de iterações para (a) resíduos em $t^*=2,0$ e (b) tempo computacional de simulação. ....	53
Figura 14. Evolução de (a) pressão, (b) velocidade longitudinal e (c) parâmetro estrutural para o caso-referência e pressão fixa na entrada. ....	56
Figura 15. Evolução de (a) pressão, (b) velocidade longitudinal e (c) parâmetro estrutural para o caso-referência e vazão fixa na entrada. ....	59



Figura 16. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo êmbolo em $z^*=0,5$ , e pressão fixa na entrada. (a) Caso-referência, (b) $Vol_t^*=0,1\%$ , (c) $Vol_t^*=0,5\%$ , (d) $Vol_t^*=1,0\%$ .....	64
Figura 17. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo êmbolo em $z^*=0,5$ e $0,7$ , e pressão fixa na entrada, cada qual com $Vol_t^*=0,5\%$ .....	67
Figura 18. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo êmbolo em $z^*=0,5$ , e vazão fixa na entrada. (a) Caso-referência, (b) $Vol_t^*=0,1\%$ , (c) $Vol_t^*=0,5\%$ , (d) $Vol_t^*=1,0\%$ .....	68
Figura 19. Evolução de pressão na entrada, para tubulação com vazão fixa na entrada, volume total $Vol_t^*=0,5\%$ , e aliviador(s) tipo êmbolo em $z^*=0,1$ ; $z^*=0,3$ e $0,7$ ; e $z^*=0,5$ e $0,7$ . ....	72
Figura 20. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo resistivo em $z^*=0,5$ , pressão fixa na entrada e $Kr^*=4,46.10^7$ . (a) Caso-referência, (b) $Vol_t^*=0,1\%$ , (c) $Vol_t^*=0,5\%$ , (d) $Vol_t^*=1,0\%$ .....	74
Figura 21. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo resistivo em $z^*=0,5$ , vazão fixa na entrada e $Kr^*=4,46.10^7$ . (a) Caso-referência, (b) $Vol_t^*=0,1\%$ , (c) $Vol_t^*=0,5\%$ , (d) $Vol_t^*=1,0\%$ .....	79
Figura 22. Evolução de pressão na entrada, para tubulação com vazão fixa na entrada, volume total $Vol_t^*=0,5\%$ , e aliviador(s) tipo resistivo em $z^*=0,1$ ; $z^*=0,7$ ; $z^*=0,1$ e $0,5$ ; e $z^*=0,7$ e $0,9$ .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores assumidos para tempos de relaxação e retardo.....	32
Tabela 2 – Fatores adimensionais constantes. ....	45
Tabela 3 – Variáveis adimensionais.....	46
Tabela 4 – Fatores adimensionais relativos aos aliviadores de pressão.....	47
Tabela 5 – Desvio médio absoluto entre valores de pressão e vazão obtidos por simulações com método das características e suas soluções analíticas. ....	52
Tabela 6 – Alterações médias para pressão, velocidade e parâmetro estrutural para simulação do caso-referência levando em conta a variação temporal do módulo elástico.....	62
Tabela 7 – Tempo de estabilização para caso de aliviador tipo êmbolo e pressão fixa na entrada, com aliviador localizado em $z^*=0,5$ . ....	65
Tabela 8 – Tempo de estabilização para aliviadores tipo êmbolo e pressão fixa na entrada, com volume adimensional total dos aliviadores de 1,0%. ....	66
Tabela 9 – Tempo de estabilização e picos de pressão para caso de aliviador tipo êmbolo e vazão fixa na entrada, com aliviador localizado em $z^*=0,5$ .....	69
Tabela 10 – Tempo de estabilização e pico de pressão para aliviadores tipo êmbolo e vazão fixa na entrada, com volume adimensional total dos aliviadores de 1%. ....	70
Tabela 11 – Tempo de enchimento e estabilização para caso de aliviador tipo resistivo e pressão fixa na entrada, com aliviador localizado em $z^*=0,5$ . ....	75
Tabela 12 – Tempo de enchimento e estabilização para aliviadores tipo resistivo e pressão fixa na entrada, com volume adimensional total dos aliviadores de 1%. ....	77
Tabela 13 – Tempo de enchimento e estabilização, e pico de pressão para caso de aliviador tipo resistivo e vazão fixa na entrada, com aliviador localizado em $z^*=0,5$ . ....	80

Tabela 14 – Tempo de enchimento e estabilização, e pico de pressão para alivadores de pressão tipo resistivo e vazão fixa na entrada, com volume adimensional total dos alivadores de 1%. .....	82
---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Romanos:

$c$	Velocidade de propagação de onda
$C^+, C^-$	Linha característica de integração
$d$	Diâmetro da tubulação
$F^+, F^-$	Fatores de discretização
$G$	Módulo de elasticidade
$K$	Índice de consistência
$K_r$	Resistência hidráulica do aliviador resistivo
$l$	Comprimento da tubulação
$m$	Constante adimensional
$M$	Volumes de controle na direção radial
$n$	Expoente da lei de potência
$N$	Volumes de controle na direção axial
$n_i$	Quantidade máxima de iterações
$n_s$	Coefficiente isentrópico do gás
$p$	Pressão
$p_{0e}$	Pressão do gás caso ocupe todo o aliviador
$p_{0r}$	Pressão no aliviador resistivo
$p_{pico,1}$	Pico de pressão inicial
$p_{pico,2}$	Pico de pressão secundário
$p_{pico,max}$	Intensidade do pico de pressão máximo
$Q$	Vazão volumétrica
$r$	Coordenada radial
$R_p$	Resíduo de pressão
$R_v$	Resíduo de velocidade axial
$s$	Número inteiro para somatório da solução analítica
$t$	Tempo
$t_{ench}$	Tempo de enchimento
$t_{est}$	Tempo de estabilização
$t_{pico,max}$	Tempo de ocorrência do pico de pressão máximo
$v$	Velocidade axial
$V$	Velocidade axial média

$Vol$	Volume de gás no êmbolo
$Vol_t$	Volume total do aliviador
$Vol_{te}$	Volume total do aliviador êmbolo
$Vol_{tr}$	Volume total do aliviador resistivo
$V_v$	Velocidade de fuga
$V_{ve}$	Velocidade de fuga do aliviador êmbolo
$V_{vr}$	Velocidade de fuga do aliviador resistivo
$z$	Coordenada axial
$Z_{aliv}$	Posição do aliviador

### **Símbolos Gregos:**

$\gamma$	Deformação
$\phi$	Relação entre inércia e dissipação viscosa
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\alpha$	Compressibilidade Isotérmica
$\beta$	Relação entre propagação da onda e dissipação viscosa
$\eta$	Viscosidade
$\theta_1$	Tempo de relaxação
$\theta_2$	Tempo de retardo
$\lambda$	Parâmetro estrutural
$\rho$	Massa específica
$\Omega_s$	Fator do somatório da solução analítica
$\omega_s$	Fator do somatório da solução analítica

### **Subscritos:**

$\infty$	Fluido desestruturado
$0$	Fluido estruturado
$e$	Elástico
$eq$	Estado de equilíbrio
$esq$	Superfície esquerda do volume
$g$	Cálculo pelas equações governantes
$i$	Índice axial
$j$	Índice radial
$s$	Estrutural

t Cálculo pelo modelo de tixotropia  
v Plástico  
w Parede (coordenada radial)  
y Estático  
yd Dinâmico

**Sobrescritos:**

\* Adimensional  
k Índice temporal

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Contexto do Tema	15
1.2	Caracterização da Oportunidade	16
1.3	Objetivos	19
1.4	Justificativa	20
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>21</b>
2.1	Modelos de Reinício de Escoamento	21
2.1.1.	Modelos que Utilizam de Equação Constitutiva para a Quebra do Gel	21
2.1.2.	Modelos que não Utilizam de Equação Constitutiva para a Quebra do Gel	23
2.2	Modelos de Tixotropia	23
2.3	Síntese do Capítulo	26
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>28</b>
3.1	Descrição da Metodologia	28
3.2	Problema Físico e Hipóteses	28
3.3	Modelagem Matemática	29
3.3.1	Equações Governantes	29
3.3.2	Modelo Matemático para a Tixotropia	30
3.3.3	Modelo Matemático Para os Aliviadores de Pressão	34
3.4	Discretização das equações	37
3.4.1	Discretização das Equações Governantes pelo Método das Características para Posição sem Aliviador de Pressão	37
3.4.2	Discretização das Equações Governantes pelo Método das Características Para Posição com Aliviador de Pressão	39
3.4.3	Discretização do Modelo de Tixotropia	40
3.4.4	Discretização do Modelo Matemático para os Aliviadores de Pressão	41
3.5	Procedimento de Cálculo	41
3.6	Adimensionalização	45
<b>4</b>	<b>Verificação do Modelo</b>	<b>48</b>
4.1	Comparação com Solução Analítica	48
4.1.1	Comparação com Solução Analítica para Pressão Fixa na Entrada	48
4.1.2	Comparação com Solução Analítica para Vazão Fixa na Entrada	50
4.2	Verificação do Critério de Convergência para a Vazão	52
<b>5</b>	<b>Discussão e Resultados</b>	<b>55</b>
5.1	Casos-referências	55
5.2	Avaliação do Efeito da Variação Temporal do Módulo Elástico	61
5.3	Avaliação da Introdução de Aliviadores tipo Êmbolo à Tubulação	63
5.3.1	Aliviadores tipo Êmbolo, Pressão Fixa na Entrada da Tubulação	63
5.3.2	Aliviadores tipo Êmbolo, Vazão Fixa na Entrada da Tubulação	67
5.4	Avaliação da Introdução de Aliviadores tipo Resistivo à Tubulação	73
5.4.1	Aliviadores tipo Resistivo, Pressão Fixa na Entrada da Tubulação	73

5.4.2	Aliviadores tipo Resistivo, Vazão Fixa na Entrada da Tubulação	78
5.5	Consolidação dos Resultados	86
6	Conclusões	89
6.1	Conclusões	89
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	90
	Referências	93

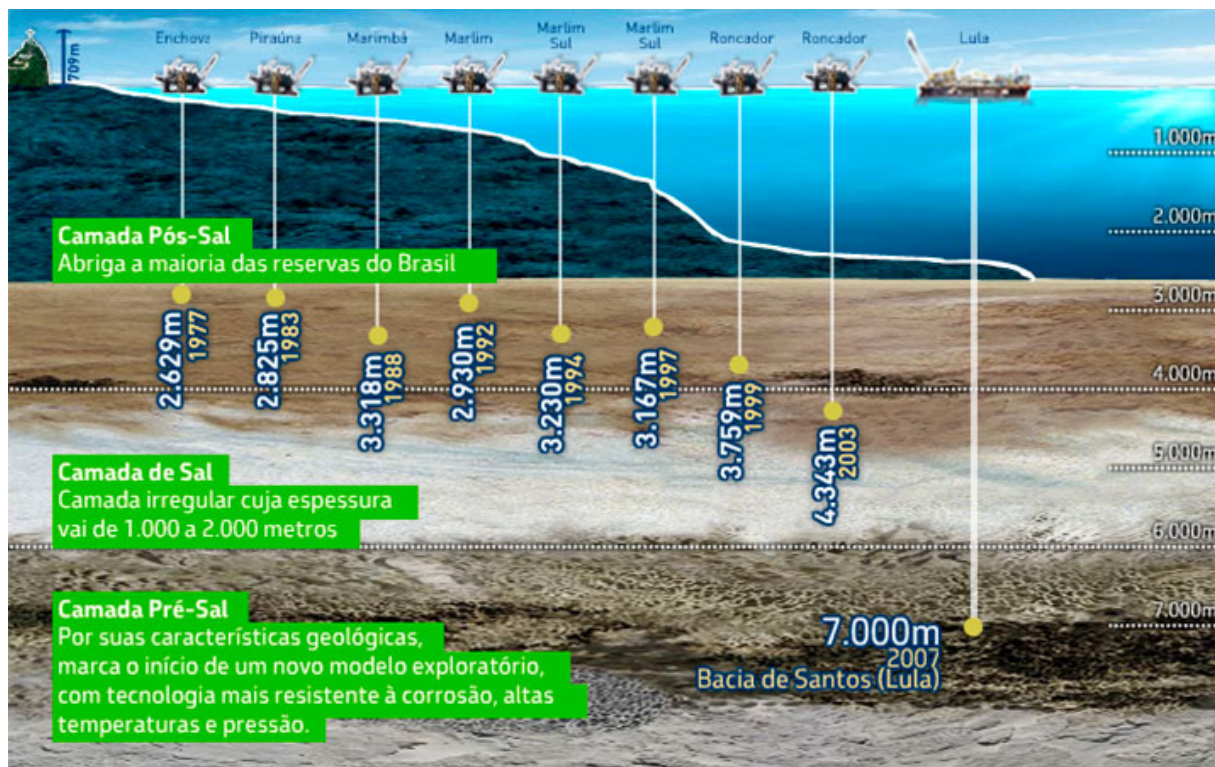


# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

Em decorrência do aumento constante da demanda por energia na sociedade moderna, a comunidade científica tem sido comumente requisitada a pesquisar sobre novas fontes de energia e melhorias em eficiências energéticas. Apesar disso, o petróleo, juntamente com o gás natural, ainda é tido como de crítica importância para o futuro próximo. A escassez de energias alternativas renováveis e eficientes, por sua vez, causa uma necessidade global pela busca de novas e eficazes fontes de petróleo e gás natural. A ascensão de novas economias também aumenta a demanda por tais fontes de energia (Larson, 2007).

No Brasil, uma das citadas economias em ascendência, a exploração de petróleo em novos poços tem sido revolucionada nos últimos anos. Um enfoque principal tem sido dado à exploração de poços de petróleo em águas profundas, como os poços do Pré-sal. Tais fontes situam-se a quilômetros abaixo do leito do mar e é estimado que suas reservas sejam até cinco vezes maiores que o montante das reservas anteriores registradas no país. A Petrobras atualmente possui 65% da área de seus blocos exploratórios em alto mar em lâminas de água de mais de 400 m (Petrobras, 2009). A Figura 1 apresenta um infográfico das diferentes profundidades de poços de petróleo marítimos. Pode observar-se que os poços do Pré-sal são aqueles localizados abaixo da camada geológica de Sal, que possui espessura de 1000 a 2000 m.



**Figura 1. Infográfico de diferentes profundidades para poços marítimos de petróleo (Petrobras, 2009).**

## 1.2 Caracterização da Oportunidade

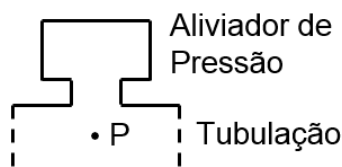
Como resultado do avanço para novas profundidades de exploração de campos de petróleo do Pré-sal, faz-se necessário o estudo de problemas inerentes à sua exploração. Um desses desafios é relacionado à composição do petróleo encontrado em tais poços, comumente de base parafínica. O petróleo com essa composição tende a gelificar a baixas temperaturas, tornando-se viscoso e de difícil mobilidade, dificultando assim o reinício do seu escoamento após uma pausa de produção (Freund e Mozés, 1982).

É importante notar que os poços do Pré-sal chegam a estar a 300 km de distância da costa brasileira (Petrobras Magazine, 2009). Uma tubulação deste comprimento, responsável pelo transporte do petróleo da plataforma de produção à costa, por exemplo, estaria sujeita a diversas dificuldades relacionadas ao reinício do seu escoamento. Nesse contexto, reinício de escoamento é compreendido como o processo de escoamento de óleo já inicialmente contido em repouso ao longo de uma tubulação. O reinício pode não ser possível dado à gelificação do fluido.

Portanto, após uma interrupção na produção, toda uma tubulação quilométrica poderia tornar-se inoperante. Da mesma forma, caso o reinício do escoamento ocorra com pressões muito altas, o duto também poderia sofrer avarias.

Para abordar os problemas relativos ao reinício do escoamento de fluidos gelificados, diversos caminhos podem ser tomados. Sabendo que a viscosidade de óleos em geral é função da temperatura, tem-se que o aquecimento do fluido gelificado no interior do tubo poderia vir a facilitar o reinício de sua produção. Da mesma forma, tubos com maiores diâmetros internos necessitariam de menores pressões para o reinício do escoamento. Outras soluções seriam, também, o emprego de tubos mais robustos, que toleram as intensas ondas de pressões provenientes do reinício do escoamento, ou o uso de fluidos não gelificados para empurrar o fluido gelificado durante a etapa de reinício de produção.

No corrente trabalho, uma possível solução para a facilitação do reinício do escoamento, do uso de aliviadores de pressão, ou simplesmente “aliviadores”, distribuídos na tubulação, é avaliada. Tais elementos serão modelados de duas maneiras distintas no decorrer do trabalho. Um exemplo de um aliviador de pressão em um ponto da tubulação é apresentado na Figura 2.



**Figura 2. Exemplo de aliviador de pressão. Autoria própria<sup>1</sup>**

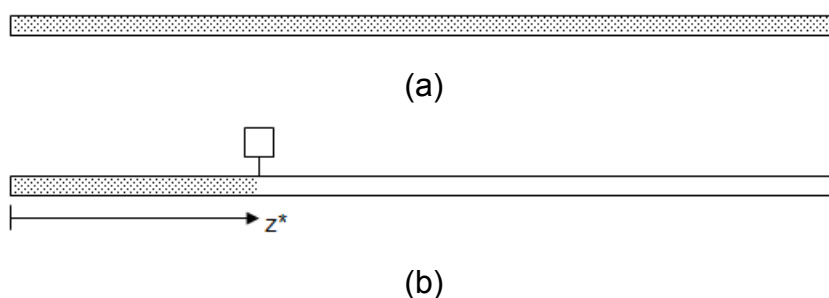
O escoamento na tubulação será, posteriormente, na etapa de hipóteses do problema físico, considerado como unidimensional. Porém, como pode-se observar da Figura 2, o fluido gelificado que se encontra especificamente no ponto P possui dois caminhos a seguir. Pode fluir tanto axialmente em relação ao tubo, quanto verticalmente adentrando o aliviador de pressão. Ambos os tipos dos aliviadores de pressão são projetados de forma a fornecer uma menor resistência ao escoamento em sua entrada, quando comparada a resistência hidráulica do escoamento no

<sup>1</sup> Todas as tabelas e figuras apresentadas adiante que não possuam fonte declarada são de autoria própria.

sentido axial. Portanto, a maior parte do fluido escoando por P irá adentrar o aliviador durante o reinício de escoamento. Vale notar que o uso de aliviadores de pressão para o reinício de escoamento de fluidos gelificados é inédito. Porém, modelagens similares para acumuladores de fluidos são apresentadas na literatura para o fenômeno de golpe de aríete (Wylie et al., 1993).

Analisando a tubulação como um todo o impacto esperado dado a introdução de aliviadores de pressão é mais facilmente avaliado. A Figura 3 apresenta dois tubos, um sem, e outro provido de aliviador de pressão em uma posição  $z^*$ . O cartilhado representa o volume de fluido até a saída do tubo ou até o aliviador de pressão. Tal volume de fluido necessita ter sua estrutura gelificada desestruturada em uma etapa inicial para que o escoamento se desenvolva.

Ao introduzir o aliviador, para o mesmo comprimento total da tubulação, o segmento de fluido que necessita ter sua estrutura quebrada em uma etapa inicial é reduzido, como observado pela menor região cartilhada na Figura 3-b. Considerando que as ondas de pressão no sistema são decorrentes do processo de quebra da estrutura gelificada do fluido, é previsto que a introdução dos aliviadores venha a aliviar os picos de pressão pela redução do volume inicial de fluido a ser desestruturado.



**Figura 3. Volume de fluido a ser desestruturado inicialmente (cartilhado), para tubulação (a) sem e (b) com aliviador de pressão em  $z^*$ .**

É previsto que, com o uso de aliviadores de pressão, a desestruturação do óleo ocorra em etapas, com a quebra gradual da estrutura gelificada do fluido para cada segmento do tubo localizando entre os aliviadores. Portanto, é esperado que o tempo até a estabilização do escoamento seja aumentado quando comparado ao tempo de reinício de escoamento sem o uso de aliviadores de pressão. Tal atraso

pode ser visto como uma consequência negativa da introdução dos aliviadores de pressão no sistema.

Uma outra consequência decorrente da introdução de aliviadores de pressão é a redução da pressão ou vazão necessária para que o escoamento ocorra. Tal fenômeno é esperado, pois, novamente, a segmentação do tubo faz com que um volume menor de fluido necessite ser desestruturado de forma a empurrar o restante do fluido e reiniciar o escoamento. Porém, por decorrência da abordagem utilizada para a modelagem do óleo, tal redução da pressão ou vazão necessária para o escoamento não poderá ser avaliada no corrente trabalho, como posteriormente explicado na Seção 3.3.2.

### **1.3 Objetivos**

Simulação numérica pode ser empregada para avaliar o reinício de escoamento de óleos parafínicos, utilizando dos dados geométricos da tubulação, e das propriedades do fluido. A simulação pode, por exemplo, informar os campos de pressão e vazão de óleo para diferentes instantes de tempo durante o fenômeno de reinício de escoamento. Seus resultados, incluindo informações relacionadas a ondas de pressão e suas oscilações, são particularmente úteis para a avaliação da integridade estrutural de tubulações em situação de reinício de escoamento.

O objetivo principal do corrente trabalho é, portanto, desenvolver um modelo matemático para simular o reinício de escoamento de óleos parafínicos gelificados em tubulações que empregam aliviadores de pressão. Objetiva-se que a ferramenta numérica venha a levar em conta efeitos importantes para a correta avaliação dos fenômenos do escoamento. Tais efeitos, que serão listados na posterior etapa de revisão bibliográfica, são relacionados a fenômenos transientes, tixotrópicos, entre outros. A ferramenta será então empregada para estudar a influência da introdução de aliviadores de pressão ao longo da tubulação, verificando os seus impactos nos campos de pressão e vazão do sistema. Vale notar que a simulação do reinício do escoamento de óleos parafínicos, em tubulações providas de aliviadores de pressão, é inédita na literatura, e portanto apresenta o maior diferencial da corrente monografia.

#### 1.4 Justificativa

A exploração de somente um campo de petróleo de Pré-sal pode ter seus custos situados na faixa de centenas de bilhões de dólares (Neder, 2013). Essa informação ajuda a compreender a ordem de grandeza associada aos investimentos e riscos financeiros da produção de tais óleos. Ferramentas de simulação computacional são conhecidas por reduzir custos da indústria petrolífera através de processos como a simulação de escoamento (Saker, 2007). Conclui-se portanto que a ferramenta proposta é de interesse comercial, levando em conta sua utilidade para a avaliação das condições de reinício de escoamento, e da integridade estrutural de tubulações; e a grandeza de custos associados ao tipo de escoamento para o qual a ferramenta poderá ser utilizada.

A contribuição científica e tecnológica da corrente monografia também merece destaque, pela abordagem inédita do uso de aliviadores de pressão para o reinício do escoamento de óleos. Além disso, a justificativa sócio-ambiental do trabalho é embasada nos futuros trabalhos a serem possivelmente desenvolvidos, que implementem na prática o uso de aliviadores de pressão. Essa implementação poderá vir, por exemplo, a aliviar picos de pressão atuantes no reinício de escoamento de óleos, evitando que uma tubulação de petróleo venha a sofrer ruptura, e conseqüentemente impedindo desastres naturais.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para o desenvolvimento de um modelo numérico de reinício de escoamento de óleos gelificados adequado é necessária uma revisão de trabalhos prévios da literatura. Para tanto, a revisão bibliográfica é dividida em dois temas chaves úteis para o presente projeto. O primeiro tema de pesquisa trata-se dos Modelos de Reinício de Escoamento. Trabalhos científicos que tratam da retomada do escoamento para diferentes condições do fluido (gelificado ou não, compressível ou não) serão estudados. O enfoque será dado em listar uma descrição evolutiva dos avanços em modelagem de reinício de escoamento, abordando as diferentes limitações e conclusões obtidas para os modelos propostos na literatura.

Secundariamente, diferentes modelos para abordar a tixotropia serão estudados. A seção definirá o conceito de tixotropia e focará em definir propriedades importantes para a compreensão do tema, e apresentar as diferentes formas de modelar tixotropia. O capítulo será concluído com uma seção de síntese, em que os trabalhos científicos considerados de particular utilidade para uso no presente trabalho serão destacados.

### **2.1 Modelos de Reinício de Escoamento**

Os diferentes modelos numéricos estudados serão divididos entre os que utilizam ou não de equações constitutivas para a quebra do gel. Posteriormente, em cada subseção, os trabalhos serão abordados de forma cronológica.

#### **2.1.1. Modelos que Utilizam de Equação Constitutiva para a Quebra do Gel**

Dentre os modelos que preveem uma equação constitutiva para a quebra do gel no reinício do escoamento, destacam-se inicialmente os trabalhos de Cawkwell e Charles (1987), Chang et al. (1999) e Davidson et al. (2004). Tais trabalhos estudam o reinício de escoamento de fluidos desprezando a inércia e os efeitos transientes do escoamento. Evidentemente esta é uma abordagem rudimentar, particularmente considerando que uma situação de reinício de escoamento é de caráter transiente.

Apesar das limitações de tais trabalhos citados no parágrafo anterior, os trabalhos servem para prover uma visão inicial ao tema e para destacar importantes

conclusões. Dentre elas, que a tensão limite de escoamento (conceito que será descrito em detalhe na Seção 2.2) influencia consideravelmente a vazão obtida após a quebra do gel. Conclui-se também que a pressão atuante e fatores reológicos variantes no tempo influenciam também a vazão (Chang et al., 1999).

Davidson et al. (2004), por sua vez, concluiu que levar em conta a compressão do fluido no reinício de escoamento deve ser levada em conta no modelo numérico. Além do tempo de quebra do gel, a compressão do fluido provoca um atraso no início do escoamento. Nesse contexto, compreende-se atraso como intervalos de tempo após o início de aplicação de pressão, até o efetivo reinício de escoamento. A modelagem da compressão por Davidson et al. (2004) é feita através da introdução do conceito de uma frente de propagação de pressão no fluido. O uso do conceito de frente de propagação de onda permite que seu trabalho se diferencie dos estudos de Cawkwell e Charles (1987) e Chang et al. (1999), que negligenciavam efeitos de compressibilidade do fluido.

Wachs et al. (2009) inovaram ao desenvolver um modelo matemático que combina características unidimensionais e bidimensionais, em um modelo intitulado *1.5D*. O modelo foi desenvolvida para estudar o reinício do escoamento de um óleo compressível gelificado. Tal trabalho combinou abordagens de dois modelos anteriores pelos mesmos autores, um bidimensional (Vinay et al., 2006) e um unidimensional (Vinay et al., 2007). O modelo 1.5D foi capaz de gerar resultados com precisão similar ao modelo 2D e reduzido tempo de simulação, e permitiu a avaliação de efeitos da compressibilidade e da tixotropia no escoamento.

Mais recentemente, Negrão et al. (2011) apresentou um modelo compressível transiente para estudar o reinício de escoamento de fluidos de perfuração. No trabalho, uma abordagem elasto-visco-plástica foi utilizada para a modelagem da tixotropia. Foi mostrado que os efeitos elásticos são importantes, para baixas taxas de deformação. O modelo, porém, como apontado por Oliveira (2011) possui a inconveniência de ser demorado a apresentar resultados por requerer malhas computacionais muito refinadas.

Vale notar que fluidos de perfuração são formulados de forma a gelificar quando em repouso, por motivos operacionais relacionados à perfuração de poços de petróleo. Tal situação é diferente para óleos parafínicos, que gelificam devido a



características de sua composição química inicial. Ou seja, enquanto fluidos de perfuração são desenvolvidos de forma a causar intencionalmente a gelificação, óleos parafínicos apresentam tal fenômeno devido à sua composição. Independente de tal razão para a gelificação, porém, conclusões e abordagens para a simulação de um tipo de fluido gelificado podem ser úteis para a análise do escoamento de outro.

### **2.1.2. Modelos que não Utilizam de Equação Constitutiva para a Quebra do Gel**

Dentre os modelos que estudam o reinício de escoamento sem avaliar a quebra do gel através de equações constitutivas, destacam-se inicialmente os trabalhos de Sestak et al. (1987) e Bjørkevoll et al. (2003). Sestak et al. (1987) considera o movimento de um óleo gelificado sendo deslocado por um óleo não gelificado. Para tanto, os dois fluidos (gelificado e não gelificado) não se misturam e, além disso, os efeitos de inércia são desprezados.

Bjørkevoll et al. (2003), por sua vez, analisou o caso de reinício do escoamento de fluidos de perfuração. O modelo descreve um comportamento transiente em que ambas a tensão e a taxa de deformação são variáveis no tempo. Uma relação logarítmica empírica é sugerida para relacionar a tensão de quebra do gel e o tempo de gelificação.

Oliveira (2011) por sua vez apresentou um modelo para a avaliação da propagação de ondas de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração. O trabalho faz uso do Método das Características com o objetivo de reduzir tempos computacionais, apontada por Wylie et al. (1993). O método consiste em transformar equações diferenciais parciais que regem o escoamento em equações diferenciais totais. Oliveira (2011) desenvolve então um modelo robusto e de resolução ágil, corroborando resultados de seu trabalho com experimentos reológicos que estudaram fluidos de perfuração.

## **2.2 Modelos de Tixotropia**

Tixotropia é definida como a característica de contínuo decréscimo da viscosidade com o tempo quando uma amostra previamente em repouso é submetida a escoamento, com posterior recuperação de viscosidade quando o

escoamento é descontinuado (Mewis e Wagner, 2009). Ou seja, fluidos tixotrópicos em repouso apresentam um aumento de sua viscosidade. O fenômeno da tixotropia abrange a gelificação de fluidos de perfuração e de óleos parafínicos.

Diferentes modelos na literatura propõem esclarecer o processo da quebra da estrutura gelificada do fluido. O início do escoamento pode ser compreendido, também, como o processo iniciado após um valor de tensão mínima para a deformação do fluido seja superada. Esta tensão é denominada como tensão limite de escoamento do fluido.

Vale notar que a tensão limite de escoamento é, como descrita por Souza Mendes e Thompson (2013), uma propriedade controversa. Sua existência é discutida no meio acadêmico mesmo após décadas de embate científico no tema. Ao admitir a existência de uma tensão limite de escoamento assume-se que não haja movimento algum do fluido quando submetido a valores de tensão abaixo da tensão limite. Argumenta-se, por outro lado, que o escoamento talvez ocorra, porém a velocidades muito baixas quando valores abaixo da tensão limite sejam aplicados ao fluido (Barnes, 1999). Neste caso, a tensão limite não existiria, porém, o fluido apresentaria viscosidade muito elevada a baixas tensões de cisalhamento.

Resultados científicos apontam, porém, para a existência da tensão limite de escoamento. Exemplo disto é o estudo de uma esfera de nylon imersa em uma solução aquosa de densidade diferente porém próxima à da esfera, que manteve-se imóvel após quatro meses de observação (Hartnett e Hu, 1989). Independente da comprovação ou não de sua existência, o conceito de tensão limite de escoamento pode ser utilizado para modelar uma grande variedade de fluidos encontrados em aplicações de engenharia (Souza Mendes e Thompson, 2013).

Outro conceito de importância para a revisão da tixotropia é o da tensão limite de escoamento aparente. Certos materiais apresentam um comportamento comum newtoniano com viscosidade muito alta (porém finita) a tensões baixas e menores de uma tensão denominada *tensão limite de escoamento aparente*. Antigamente se acreditava que tais materiais eram possuidores de tensão limite de escoamento (Souza Mendes e Thompson, 2013). Os modelos de tixotropia podem portanto, serem divididos entre modelos úteis para fluidos com tensão limite de escoamento e os úteis para fluidos com tensão limite de escoamento aparente.

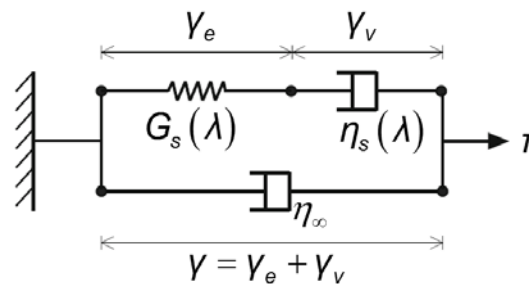
Em sua grande maioria, na literatura são apresentados modelos matemáticos para fluidos com tensão limite de escoamento. Os modelos em geral caracterizam-se por utilizarem de uma abordagem clássica para a curva tensão-deformação do fluido com a introdução de um *parâmetro estrutural*. Tal parâmetro define o estado microestrutural do material. Tal propriedade pode existir, como é comum, na forma de uma variável  $\lambda$  que assume valores altos para o caso em que o fluido está estruturalmente gelificado e baixos para quando o fluido não se encontra gelificado. Variáveis relacionadas à viscosidade podem então ser definidas como funções do parâmetro estrutural.

Subdivisões da abordagem do parâmetro estrutural para a modelagem da tixotropia tratam da formulação de tal propriedade, que pode ser considerada função da tensão ou da deformação do fluido. Dentre os trabalhos que utilizam de  $\lambda$  como função da tensão atuante no fluido estão os modelos de Moore (1959), Houska (1981), Barnes (1997), Mujumdar et al. (2002) e Mewis and Wagner (2009). Trabalhos que definem o parâmetro estrutural como função da deformação no fluido, por sua vez, incluem os estudos de Quemada (1999), Bautista et al. (1999) e Yziquel et al. (1999).

Souza Mendes e Thompson (2013) apresentaram recentemente um modelo que utiliza de um parâmetro  $\lambda$  para o parâmetro estrutural do fluido, combinando simplicidade de modelagem com uma base em conceitos físicos. Tal abordagem, denominada de cinética estrutural, é considerada a mais apropriada atualmente para modelagem de tixotropia (Negrão et al., 2011). Tal abordagem evolui a partir de trabalhos anteriores pelos autores (Souza Mendes 2009, Souza Mendes 2011) e consiste na avaliação do comportamento elasto-visco-plástico do fluido utilizando-se de uma analogia com um sistema mecânico massa-mola. Seu modelo apresenta como resultado tendências observadas na prática por testes experimentais. Diferente dos outros modelos citados, o modelo de Souza Mendes e Thompson (2013) também serve para ambos fluidos com tensão de limite de escoamento real ou aparente.

A analogia mecânica massa-mola do modelo de Souza Mendes e Thompson (2013) é apresentado na Figura 4. Em tal analogia, a deformação total do fluido,  $\gamma$ , é resultado da soma da deformação elástica,  $\gamma_e$ , e da deformação plástica  $\gamma_v$ . A

deformação elástica ocorre em função do módulo elástico  $G_s$ , enquanto a deformação plástica em função da viscosidade estrutural  $\eta_s$ . Ambos os parâmetros  $G_s$  e  $\eta_s$  são funções do parâmetro estrutural  $\lambda$ . A variável  $\eta_\infty$  representa, como previamente descrito, a viscosidade do fluido totalmente desestruturado, e  $\tau$  a tensão de cisalhamento.



**Figura 4. Analogia mecânica massa-mola para o modelo de tixotropia. (Souza Mendes e Thompson, 2013)**

### 2.3 Síntese do Capítulo

No corrente capítulo revisões da literatura nos temas de simulação de escoamento de fluidos e de tixotropia foram apresentadas. Foram descritos diversos modelos numéricos para o reinício do escoamento de fluidos, apresentados nas últimas décadas. Tais modelos em geral trabalham com balanços de massa e quantidade de movimento, e cada qual possui suas limitações. Dentre eles destacam-se os que levam em conta a gelificação do fluido, e também os que utilizam do método das características para a redução do tempo computacional.

Quanto à revisão sobre tixotropia, foram descritos conceitos de tensão de limite de escoamento real e aparente, e então listados diferentes modelos numéricos para a abordagem da tixotropia. Dentre os modelos se destaca o desenvolvido por Souza Mendes e Thompson (2013), que utiliza de uma abordagem considerada a mais apropriada para modelagem da tixotropia. Tal modelo também atende a ambos fluidos com tensão limite de escoamento real e aparente. O modelo de Souza Mondes e Thompson, porém, não atenta para efeitos de variação temporal do módulo elástico do fluido, que são desprezados. Tais efeitos serão portanto avaliados no decorrer do trabalho.

São listadas as abordagens da literatura que serão utilizadas no corrente trabalho. O modelo numérico é fracamente compressível, e conta com equação constitutiva para o comportamento elasto-visco-plástico do gel, como no modelo de Negrão et al. (2011). Efeitos de elasticidade ao cisalhamento serão portanto considerados. O trabalho também utiliza do modelo para tixotropia apresentado por Souza Mendes e Thompson (2013). Utilizará também do método das características para redução do tempo de resposta computacional como utilizado por Oliveira (2011). Como exposto na Seção 1.3, o principal diferencial do trabalho será a introdução de aliviadores de pressão na tubulação para o fenômeno de reinício de escoamento de óleos gelificados, não previamente abordado na literatura.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Descrição da Metodologia**

O desenvolvimento do modelo de simulação numérica inicia-se na etapa de revisão bibliográfica. Após as diferentes áreas de pesquisa terem sido estudadas, são eleitas as melhores abordagens encontradas na literatura para modelar o problema. O problema físico então é estudado no sentido de definirem-se as hipóteses e equações a serem utilizadas no desenvolver do trabalho.

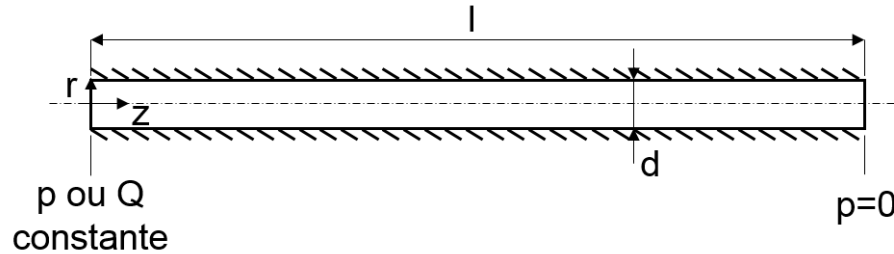
O modelo será desenvolvido na forma de um sistema de equações matemáticas. Uma resolução numérica é então empregada e resultados levantados a fim de estudar o comportamento do problema físico dado diferentes variáveis de entrada no modelo matemático. Conclusões serão feitas a partir do que era esperado e do que obteve-se como resultados de variáveis de saída do modelo.

### **3.2 Problema Físico e Hipóteses**

Como descrito na Seção 1, o problema físico em questão é o do reinício do escoamento de óleos parafínicos gelificados em uma tubulação provida (ou não) de aliviadores de pressão. Tal tubulação pode representar tanto a linha de transporte do óleo em estado mineral do poço de extração em alto mar até a plataforma, quanto o caminho de saída da plataforma até o continente. Ambos os caminhos possuem diferentes características de pressão e orientação (em relação à atuação da aceleração da gravidade). Além disso, como descrito anteriormente, o caminho plataforma-costa pode possuir centenas de quilômetros de comprimento, enquanto o caminho poço-plataforma possui em geral comprimentos de menores ordens de grandeza. Apesar disso, a título de simplificação do sistema, o problema físico será interpretado para o presente trabalho como um tubo horizontal de diâmetro constante sem variações de pressão externa, e gravidade negligenciada.

A condição de contorno na saída da tubulação será de pressão manométrica nula (pressão atmosférica). A condição de contorno na entrada será de pressão ou vazão constante. Demais hipóteses são escoamento unidimensional, laminar, fracamente compressível e isotérmico. A Figura 5 apresenta um desenho simplificado do problema físico e das condições de contorno do escoamento.

Apresenta também os parâmetros geométricos de comprimento  $l$  e diâmetro  $d$  do tubo por onde ocorre o escoamento, e as coordenadas longitudinal  $z$  e radial  $r$  do escoamento. As condições de contorno são apresentadas usando variáveis  $p$  para pressão e  $Q$  para vazão volumétrica.



**Figura 5. Desenho do problema físico e condições de contorno.**

### 3.3 Modelagem Matemática

A presente seção diz respeito à apresentação das equações que compõem o modelo matemático representante do problema físico.

#### 3.3.1 Equações Governantes

O modelo proposto se baseia em balanços de massa e quantidade de movimento. A Equação (1) apresenta a conservação de massa para o escoamento em um tubo (Olivera, 2011).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial V}{\partial z} + V \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

em que  $\rho$  e  $V$  são, respectivamente, valores médios da massa específica e da velocidade no sentido longitudinal do duto. A coordenada no sentido do escoamento é  $z$  e  $t$  é o tempo. A equação de conservação de massa pode ter sua variável de densidade substituída através do uso do conceito de compressibilidade isotérmica, apresentada na Equação (2).

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_T = \frac{1}{\rho c^2} \quad (2)$$

em que  $\alpha$ ,  $p$  e  $c$  representam, respectivamente, a compressibilidade isotérmica do fluido, a pressão e a velocidade de propagação da onda de pressão característica no

fluido (Anderson, 1990). Combinando as Equações (1) e (2) e eliminando o termo relativo à variação da densidade no sentido do escoamento, tem-se o balanço de massa dado por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Vale notar que a eliminação do termo de variação da densidade presente na equação (1) ocorre pela elaboração do modelo definido como fracamente compressível. Essa consideração permite que a variação da densidade em relação a  $z$  seja desprezada, enquanto que a variação da densidade em relação ao tempo seja abordada pela compressibilidade isotérmica. Tal simplificação não deve trazer prejudicar consideravelmente a precisão do modelo, como observado por Oliveira et al. (2010). A Equação (4) apresenta portanto a versão final do balanço da quantidade de movimento do escoamento (Olivera et al., 2013).

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho V \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{4}{d} \tau_w \quad (4)$$

em que  $d$  é o diâmetro interno do tubo. A tensão de cisalhamento na parede do tubo é representada por  $\tau_w$ .

### 3.3.2 Modelo Matemático para a Tixotropia

Para a modelagem da tixotropia, as equações do modelo de Souza Mendes e Thompson (2013) serão utilizadas. A equação (5) apresenta a função para a tensão no fluido para o caso de materiais com tensão limite de escoamento aparente, tal qual modelado para o petróleo gelificado. Tal equação segue o modelo de Jeffreys (Bird et al., 1987).

$$\dot{\gamma} + \theta_2(\lambda) \ddot{\gamma} = \frac{\theta_2(\lambda)}{\eta_\infty} \left( \frac{\tau}{\theta_1(\lambda)} + \dot{\tau} \right) \quad (5)$$

em que  $\gamma$  e  $\tau$  representam, respectivamente, a deformação e tensão de cisalhamento no fluido, e  $\eta_\infty$  é a viscosidade do fluido totalmente desestruturado (não-gelificado). Os termos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são parâmetros de tempos de relaxação e retardo, respectivamente, que dependem indiretamente da variável de parâmetro estrutural,  $\lambda$ . Tal variável assume um valor mínimo de zero para o caso do fluido



estar totalmente não estruturado, e um valor positivo alto para o fluido em estado gelificado. Os índices ponto e duplo ponto fazem referência às derivadas totais de primeira e segunda ordem de suas variáveis em relação ao tempo.

No corrente trabalho assume-se que o óleo parafínico é detentor de tensão limite de escoamento aparente. Portanto, a aplicação de tensões inferiores à tensão limite de escoamento deve resultar em um escoamento do fluido, porém com valores muito baixos para a deformação. Vale notar que é proposto também por Souza Mendes e Thompson (2013) um modelo para a tensão no fluido para o caso de materiais com tensão limite de escoamento real. Se o óleo fosse modelado como detentor de tensão limite de escoamento real, e o modelo para tensão real fosse utilizado, não haveria escoamento ou deformações para tensões aplicadas inferiores à tensão limite de escoamento

O uso do modelo de tensão limite de escoamento aparente é eleito pela simplificação do problema. Isso ocorre pois as equações que regem a tensão de cisalhamento no fluido detentor de tensão limite de escoamento aparente são mais facilmente implementadas em uma ferramenta computacional. Deve ser reconhecido, porém, que o uso de tal modelagem para a tixotropia limita a aplicação da ferramenta computacional desenvolvida. Fluidos com tensão limite de escoamento real não podem ser simulados pela ferramenta.

Além disso, não se pode avaliar a tensão ou pressão necessária, na condição de contorno de entrada, para que o reinício de escoamento ocorra, quando assume-se que o fluido possua tensão limite de escoamento aparente. Tal avaliação não pode ser realizada pois por mais baixo que seja a tensão aplicada, o escoamento virá a ocorrer. Portanto, não se pode analisar no corrente trabalho se a introdução de aliviadores de pressão faz reduzir a pressão ou vazão na entrada do tubo necessária para que haja o reinício de escoamento.

Vale-se argumentar, porém, que como descrito na Seção 2.2 de revisão bibliográfica, a existência ou não da tensão limite de escoamento real é debatida na comunidade científica. Portanto, não há nenhum argumento definitivo para afirmar que modelar petróleo parafínico gelificado como um fluido com tensão limite de escoamento aparente é errôneo.

Os tempos de relaxação e retardo, apresentados na Equação (5), são funções do módulo elástico  $G_s$  da analogia massa-mola, Figura 4. Souza Mendes e Thompson (2013) escolheram por desprezar a variação do módulo elástico  $G_s$  com o tempo,  $\dot{G}_s$ , apesar de  $G_s$  não ser constante. Com o objetivo de verificar a influência de tal variação temporal do módulo elástico, o modelo para a tixotropia foi adaptado no corrente trabalho, de forma a considerá-la ou não. A Tabela 1 apresenta as diferentes equações utilizadas para os tempos de relaxação e retardo,  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , para ambos os casos. Pode observar-se que ambas as colunas apresentam as mesmas expressões para o caso de  $\dot{G}_s = 0$ .

**Tabela 1 – Valores assumidos para tempos de relaxação e retardo.**

Varição do módulo elástico no tempo desprezada.	Varição do módulo elástico no tempo considerada.
$\theta_1(\lambda) = \frac{\eta_s(\lambda)}{G_s(\lambda)}$ (6-a)	$\theta_1(\lambda) = \frac{\eta_s(\lambda)}{G_s(\lambda) - \left(\frac{\dot{G}_s(\lambda)}{G_s(\lambda)}\right) \eta_s(\lambda)}$ (6-b)
$\theta_2(\lambda) = \frac{\eta_s(\lambda)\eta_\infty}{G_s(\lambda)(\eta_s(\lambda) + \eta_\infty)}$ (7-a)	$\theta_2(\lambda) = \frac{\eta_s(\lambda)\eta_\infty}{G_s(\lambda)(\eta_s(\lambda) + \eta_\infty) - \left(\frac{\dot{G}_s(\lambda)}{G_s(\lambda)}\right) \eta_s(\lambda)\eta_\infty}$ (7-b)

em que  $\eta_s$ ,  $G_s$  e  $\dot{G}_s$  representam, respectivamente, a viscosidade estrutural do fluido, o módulo de elasticidade do fluido e a variação do módulo de elasticidade com o tempo:

$$\eta_s(\lambda) = \eta_\infty(e^\lambda - 1) \quad (8)$$

$$G_s(\lambda) = G_0 e^{m\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)} \quad (9)$$

$$\dot{G}_s(\lambda) = -\frac{mG_s(\lambda)}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dt} \quad (10)$$

em que  $\lambda_0$  e  $G_0$  representam o parâmetro estrutural e o módulo de elasticidade para o fluido totalmente estruturado, respectivamente, e  $m$  é uma constante adimensional positiva. O parâmetro estrutural do fluido,  $\lambda$ , varia na faixa entre 0 (totalmente

desestruturado) e  $\lambda_0$ , que é por sua vez calculado pela relação logarítmica  $\lambda_0 = \log(\eta_0/\eta_\infty)$ . O parâmetro  $\lambda$  é calculado através da seguinte equação cinética:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{t_{eq}} \left[ \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^a - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{eq}} \right)^b \left( \frac{1}{\lambda_{eq}} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^a \right] \quad (11)$$

em que  $t_{eq}$  é o tempo característico para a recuperação estrutural do fluido e  $\lambda_{eq}$  é o parâmetro estrutural de equilíbrio calculado através de:

$$\lambda_{eq}(\tau) = \ln \left( \frac{\eta_{eq}}{\eta_\infty} \right) \quad (12)$$

e  $\eta_{eq}$  é a viscosidade de equilíbrio calculada através de:

$$\eta_{eq}(\dot{\gamma}_{eq}) = (1 - e^{-\eta_0 \dot{\gamma}_{eq} / \tau_y}) \left[ \frac{\tau_y - \tau_{yd}}{\dot{\gamma}_{eq}} e^{-\dot{\gamma}_{eq} / \dot{\gamma}_{yd}} + \frac{\tau_{yd}}{\dot{\gamma}_{eq}} + K \dot{\gamma}_{eq}^{n-1} \right] + \eta_\infty \quad (13)$$

onde  $K$  e  $n$  são os índices de consistência e expoente da lei de potência. As variáveis  $\tau_{yd}$  e  $\dot{\gamma}_{yd}$  representam, respectivamente, a tensão de escoamento dinâmica, e a taxa de deformação que marca a transição de  $\tau_y$ , tensão de escoamento estática, para  $\tau_{yd}$ . A variação da tensão de cisalhamento na direção radial do tubo é admitida como linear para a simplificação do problema:

$$\tau = \tau_w \frac{2r}{d} \quad (14)$$

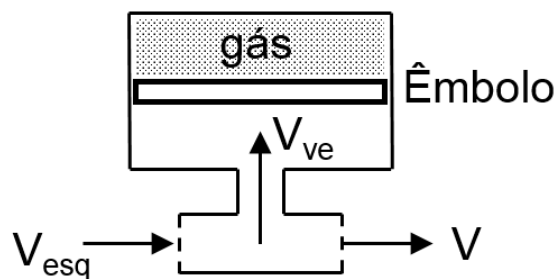
em que  $r$  é a posição radial, e  $\tau_w$  a tensão na parede interna do tubo. A Equação (14) é substituída na Equação (5), com  $-\partial v / \partial r$  definida como a taxa de deformação, resultando em:

$$-\frac{\partial v}{\partial r} + \theta_2(\lambda) \frac{\partial}{\partial t} \left( -\frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{2r}{d} \frac{\theta_2(\lambda)}{\eta_\infty} \left( \frac{\tau_w}{\theta_1(\lambda)} + \dot{\gamma}_w \right) \quad (15)$$

em que  $v$  é a velocidade axial. Assumindo  $\tau_w$  como uma variável conhecida, a equação (15) pode ser integrada para obter-se o campo de velocidades radiais para cada instante de tempo. O cálculo iterativo para a obtenção de  $\tau_w$  será discorrido na Seção 3.5.

### 3.3.3 Modelo Matemático Para os Aliviadores de Pressão

Duas abordagens para os aliviadores de pressão do sistema, tal como idealizados na Seção 1.2, serão estudados. O primeiro tipo de aliviador é denominado *êmbolo*, e tanto receberá como retornará fluido à tubulação durante o reinício de escoamento. Tal aliviador possui um volume total,  $Vol_{te}$ , que é ocupado por duas câmaras, uma contendo um gás, e outra o óleo que adentra o aliviador de pressão. As câmaras são separadas por um êmbolo. Tal aliviador de pressão é esquematizado na Figura 6.



**Figura 6. Desenho do aliviador de pressão do tipo êmbolo.**

No desenho, o índice *esq* representa a velocidade média axial avaliada na superfície esquerda do volume, e o índice *ve* representa a velocidade de fuga de fluido para dentro do aliviador tipo êmbolo. É assumido que o êmbolo possui movimento livre e que, portanto, a pressão do gás para qualquer instante de tempo é igual à pressão do óleo na posição da tubulação em que o aliviador está localizado. Também se considera que a compressão e expansão do gás ocorre de forma isentrópica. Faz-se necessário deduzir a velocidade média de fuga de óleo da tubulação para dentro do aliviador de pressão do tipo êmbolo,  $V_{ve}$ . A equação (16) apresenta a relação de pressão e volume do gás válida para qualquer instante de tempo (Moran et al., 2010):

$$p(Vol)^{n_s} = p_{oe}(Vol_{te})^{n_s} \quad (16)$$

em que  $Vol$  e  $n_s$ , são, respectivamente, o volume de gás no aliviador tipo êmbolo variável com o tempo, e o coeficiente isentrópico do gás, assumido igual ao do ar, de 1,4. As variáveis  $p$  e  $p_{oe}$  representam a pressão local do óleo (e conseqüentemente do gás) no ponto da tubulação em que o aliviador está localizado, variante com o

tempo; e a pressão do gás caso ele ocupasse o volume total do aliviador. A variação do volume do gás dentro do aliviador de pressão pode então ser escrita como:

$$\frac{\partial Vol}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( Vol_{te} \left( \frac{p_{0e}}{p} \right)^{1/n_s} \right) \quad (17)$$

O gás e o óleo nos compartimentos do aliviador competem pelo mesmo volume total, portanto a variação do volume de óleo dentro do aliviador é o negativo da variação do volume de gás. A velocidade de fuga do óleo para dentro do aliviador de pressão é portanto calculada pela variação do volume de óleo com o tempo dividida pela área de entrada do aliviador:

$$V_{ve} = - \frac{1}{(\pi d^2 / 4)} \frac{\partial}{\partial t} \left( Vol_{te} \left( \frac{p_{0e}}{p} \right)^{1/n_s} \right) \quad (18)$$

Vale notar que, para as equações (16) a (18), as pressões utilizadas são absolutas, e não manométricas. Isso ocorre pela formulação da lei dos gases utilizar de valores de pressão absoluta. Para a simplificação do problema, em ambos tipos de aliviadores de pressão a área de entrada de fluido no aliviador é considerada igual à área da seção transversal da tubulação.

O segundo aliviador de pressão é o tipo *resistivo*. O aliviador apresenta uma resistência hidráulica  $K_r$  à entrada de fluido e não permite saída de fluido. A abordagem é exemplificada na Figura 7.

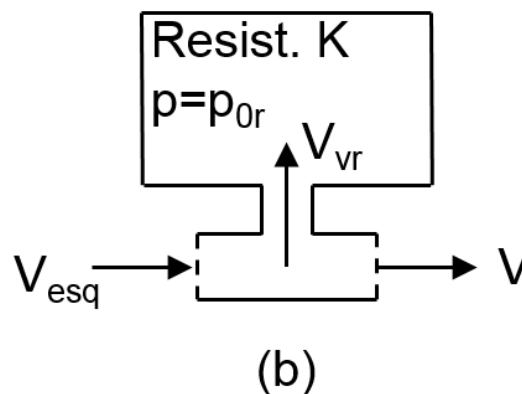


Figura 7. Desenho do aliviador de pressão do tipo resistivo.

No desenho, o índice  $esq$  representa novamente a velocidade média axial avaliada na superfície esquerda do volume, e o índice  $vr$  representa a velocidade de fuga de fluido para dentro do aliviador tipo resistivo. A entrada de fluido ocorre até que o volume de óleo atinja o volume máximo do aliviador resistivo,  $Vol_{tr}$ . A partir de tal momento a velocidade é então igualada a zero. A equação (19) apresenta a resistência hidráulica definida para a entrada do fluido no aliviador:

$$p - p_{or} = K_r V_{vr}^2 \quad (19)$$

em que  $p$ ,  $p_{or}$ ,  $K_r$  e  $V_{vr}$  representam, respectivamente, as pressões no óleo na posição em que o aliviador tipo resistivo está localizado e no próprio aliviador de pressão, a resistência hidráulica para a entrada de fluido no aliviador e a velocidade vertical do fluido entrando no aliviador do tipo resistivo. A velocidade de fuga adentrando o aliviador resistivo pode então ser escrita:

$$V_{vr} = \sqrt{\frac{p - p_{or}}{K_r}} \quad (20)$$

Levando-se em conta que a área de entrada dos aliviadores de pressão é a mesma que a área da seção transversal da tubulação, um balanço de massa no volume de controle garante a seguinte relação:

$$V_{esq} = V_v + V \quad (21)$$

em que o índice  $esq$  representa a propriedade avaliada na superfície esquerda do volume. O índice  $v$  representa genericamente a velocidade vertical ou velocidade de fuga do fluido da tubulação para dentro do aliviador tipo êmbolo ( $ve$ ) ou resistivo ( $vr$ ).

Vale comentar que a implementação física de cada um dos dois tipos de aliviadores de pressão em uma tubulação de petróleo apresentaria diferentes problemas de engenharia a serem trabalhados. O aliviador tipo êmbolo, por exemplo, poderia apresentar fuga de gás através da folga do êmbolo. Da mesma forma, o êmbolo por ser modelado como um elemento sem amortecimento pode, na simulação numérica, mover-se abruptamente durante pequenos intervalos de tempo por motivo de alterações bruscas de pressão. É esperado que o amortecimento do êmbolo venha a impedir tais movimentos bruscos em uma aplicação real, e portanto neste caso a influência de tais efeitos de amortecimento devem ser avaliados.

O aliviador de pressão tipo resistivo, por sua vez, apresenta ainda mais dificuldades de execução. O engenheiro projetista teria de desenvolver o aliviador resistivo de forma a somente receber fluido durante a situação de reinício de escoamento, e teria de lidar com o problema de retirar o fluido do aliviador após tal reinício para que tal elemento possa ser utilizado mais de uma vez.

Tais problemas, como o de esvaziar o petróleo de uma válvula submarina localizada em meio à uma tubulação quilométrica, fogem ao escopo do trabalho. A presente monografia, por se tratar de um trabalho pioneiro no uso dos aliviadores de pressão em uma linha de produção de petróleo em que há reinício de escoamento, é focada em estudar unicamente as vantagens para o escoamento previstas dado a introdução de tais elementos. Deve-se notar, porém, que as desvantagens e dificuldades técnicas da implementação efetiva de cada tipo de aliviador serão tratadas nas conclusões do trabalho e na seção de sugestões para trabalhos futuros, Capítulo 6.

### **3.4 Discretização das equações**

As equações relativas às conservações de massa e quantidade de movimento, Equações (3) e (4), serão convertidas de equações diferenciais parciais em equações diferenciais totais através do método das características. Após a conversão, o método das diferenças finitas é utilizado para a resolução das equações. Quanto ao modelo de tixotropia e dos aliviadores de pressão, a resolução será feita através do método dos volumes finitos. As subseções a seguir apresentarão tais discretizações.

#### **3.4.1 Discretização das Equações Governantes pelo Método das Características para Posição sem Aliviador de Pressão**

A presente seção apresenta a discretização das equações governantes pelo método das características (MOC) para o caso geral, ou seja, para volumes de controle que não possuem aliviadores. Tal método é tipicamente usado para a resolução de equações diferenciais hiperbólicas parciais (Wylie et al., 1993). Para o corrente trabalho, as Equações (3) e (4) são reduzidas a duas equações diferenciais totais, válidas sobre as linhas características  $dz/dt=\pm c$ :

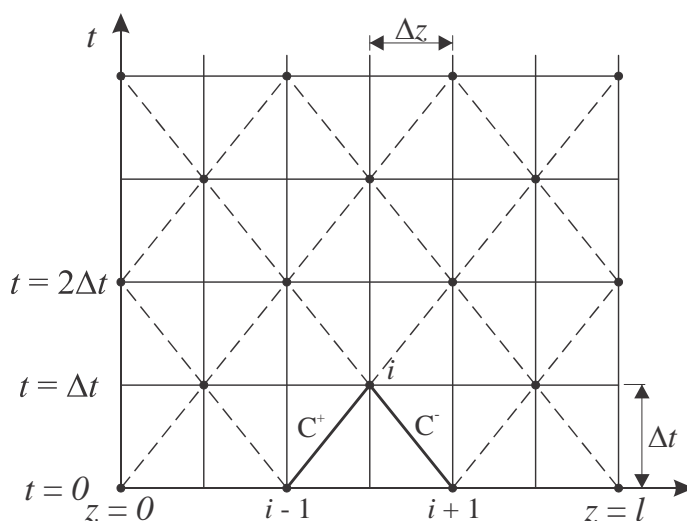
$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{dt} + \rho c \frac{dV}{dt} + \frac{4c}{d} \tau_w = 0 \\ \frac{dz}{dt} = +c \end{aligned} \right\} \quad C^+ \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{dt} = -c \end{aligned} \right\} \quad C^- \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dp}{dt} + \rho c \frac{dV}{dt} + \frac{4c}{d} \tau_w = 0 \\ \frac{dz}{dt} = -c \end{aligned} \right\} \quad C^- \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{dt} = -c \end{aligned} \right\} \quad C^- \quad (25)$$

A Figura 8 apresenta o eixo z-t no qual as linhas características  $C^+$  e  $C^-$  são integradas. As Equações (21) e (22) valem para caminhos de integração nas linhas  $C^+$ , enquanto as Equações (23) e (24) valem para caminhos nas linhas  $C^-$ . O método funciona de forma que a cada processo de resolução através das linhas características, o campo avança dois passos de tempo ( $2\Delta t$ ).



**Figura 8. Campo z-t para a resolução através do Método das Características.**

A tubulação é dividida em  $N$  elementos em seu sentido longitudinal, separados por um intervalo constante  $\Delta z$ . Tal qual pode observar-se nas Equações (22) e (24), para a elaboração do campo z-t é necessário que  $\Delta t = \Delta z / c$ . Ao passo que as variáveis de interesse  $V$  e  $p$  sejam conhecidas em uma posição  $i$ , e  $\tau_w$  seja assumido como conhecida, a integração das Equações (21) e (23) sob suas respectivas linhas  $C^+$  ou  $C^-$  permite a obtenção dos valores de  $V$  e  $p$  na próxima



posição no tempo e espaço. Realizando a integração e discretização das Equações (21) e (23) obtêm-se as seguintes expressões para pressão e velocidade:

$$p_i^{k+1} = \frac{F_+ + F_-}{2} \quad (26)$$

$$V_i^{k+1} = \frac{F_+ - F_- - \frac{4}{d} \tau_{w,j}^{k+1} \Delta z}{2\rho c} \quad (27)$$

em que os índices  $k$ ,  $k-1$  e  $k+1$  representam o tempo de cálculo presente, passado e futuro (sendo calculado). O índice  $i$  faz referência à coordenada axial do escoamento. Os fatores  $F_+$  e  $F_-$  são calculados através de:

$$F_+ = p_{i-1}^k + \rho c V_{i-1}^k - \frac{2}{d} \tau_{w,j-1}^k \Delta z \quad (28)$$

$$F_- = p_{i+1}^k - \rho c V_{i+1}^k + \frac{2}{d} \tau_{w,j+1}^k \Delta z \quad (29)$$

Vale notar que para posições axiais nos extremos da tubulação as mesmas equações são utilizadas. A diferença é de que para os extremos, sabe-se a condição de contorno relativa a sua posição, constante para qualquer instante de tempo.

### 3.4.2 Discretização das Equações Governantes pelo Método das Características Para Posição com Aliviador de Pressão

A presente seção apresenta a discretização das equações governantes para volumes de controle que possuem aliviadores de pressão. As linhas de integração  $C^-$  e  $C^+$ , provenientes do Método das Características e demonstradas na Figura 8, são válidas. Portanto, as equações (21) e (23) são utilizadas. No entanto, para um volume de controle provido de aliviador de pressão, as equações discretas (25) a (28) não são válidas. Isso ocorre pois, como apresentado na Figura 7, os volumes de controle possuidores de aliviadores de pressão não apresentam somente uma velocidade média e uma tensão de cisalhamento, tal qual os volumes de controle que não possuem aliviadores de pressão.

Cada volume de controle possuidor de um aliviador de pressão possui dois pares de velocidade e tensão de cisalhamento, um referente à fronteira esquerda e outro à fronteira direita do volume de controle. A pressão por sua vez é considerada

constante em todo o volume de controle, e portanto as equações das linhas de integração  $C^+$  e  $C^-$  se tornam:

$$(p_i^{k+1} - p_{i-1}^k) + \rho c (V_{esq,i}^{k+1} - V_{i-1}^k) + \frac{2\Delta z}{d} (\tau_{esq,w,i}^{k+1} + \tau_{w,i-1}^k) = 0 \quad (30)$$

$$-(p_i^{k+1} - p_{i+1}^k) + \rho c (V_i^{k+1} - V_{i+1}^k) + \frac{2\Delta z}{d} (\tau_{w,i}^{k+1} + \tau_{w,i+1}^k) = 0 \quad (31)$$

em que o índice *esq* representa novamente a velocidade ou tensão de cisalhamento na fronteira esquerda do volume de controle, como apresentado pelas velocidades com índice *esq* nas Figura 6 e Figura 7. Os índices *k* e *i* novamente representam o tempo e a posição axial do escoamento, respectivamente.

O sistema de equações para o volume de controle possuidor do aliviador é portanto finalizado com seis incógnitas (duas velocidades no sentido do escoamento, duas tensões de cisalhamento, uma pressão e uma velocidade vertical). As equações necessárias para resolver o sistema são as obtidas pelas linhas de integração, (29) e (30), o balanço de massa no volume, (20), a equação que descreve a entrada de fluido no aliviador, (17) ou (19), e a relação entre tensão de cisalhamento e a velocidade média de escoamento explorada na Seção 3.4.3 a seguir, para cada par tensão de cisalhamento-velocidade.

### 3.4.3 Discretização do Modelo de Tixotropia

Dividindo o raio da tubulação em *M* elementos, a Equação (15) é discretizada usando-se do método das diferenças finitas implícito, o que resulta na seguinte equação algébrica:

$$(1 + e)v_{j,j}^{k+1} = (1 + e)v_{j+1,j}^{k+1} + e(v_{j,j}^{k-1} - v_{j+1,j}^{k-1}) + \frac{(r_{j+1}^2 - r_j^2)}{\eta_\infty d} [(e + f)\tau_{w,j}^{k+1} - e\tau_{w,j}^{k-1}] \quad (32)$$

em que  $e = \frac{\theta_{2,j,i}^{k+1}}{\Delta t}$ ,  $f = \frac{\theta_{2,j,i}^{k+1}}{\theta_{1,j,i}^{k+1}}$ . As posições *j* e *j+1* representam duas posições radiais

adjacentes. Como  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são funções do parâmetro estrutural  $\lambda$ , a obtenção de  $\lambda$  é feita através da discretização explícita da Equação (11):

$$\lambda_{j,i}^{k+1} = \lambda_{j,i}^k + \frac{\Delta t}{t_{eq}} \left[ \left( \frac{1}{\lambda_{j,i}^k} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^a - \left( \frac{\lambda_{j,i}^k}{\lambda_{eq,j,i}^{k+1}} \right)^b \left( \frac{1}{\lambda_{eq,j,i}^{k+1}} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^a \right] \quad (33)$$

em que  $\lambda_{eq,j,i}$  é obtida através da Equação (12) como função do valor local de tensão de cisalhamento. A velocidade axial obtida através da Equação (32) é então integrada numericamente para obter-se a velocidade média:

$$\bar{V}_i^{k+1} = \frac{2}{d^2} \sum_{j=1}^M (v_{j+1,i}^{k+1} + v_{j,i}^{k+1}) (r_{j+1}^2 - r_j^2) \quad (34)$$

Vale notar que para a discretização das equações do modelo de tixotropia, as mesmas equações obtidas para o caso comum (posição sem aliviador) podem ser utilizadas para posições na tubulação com aliviador de pressão.

#### 3.4.4 Discretização do Modelo Matemático para os Aliviadores de Pressão

Para a discretização do modelo matemático dos aliviadores de pressão, o método dos volumes finitos é novamente utilizado. Partindo da equação (18) é feita a seguinte discretização implícita para o caso do aliviador tipo êmbolo, para avaliar a velocidade de fuga no tempo  $k+1$  e posição axial  $i$ :

$$V_{ve,i}^{k+1} = -\frac{1}{(\pi d^2 / 4)} \frac{Vol_{te}}{\Delta t} \left( \left( \frac{p_{0e}}{p_i^{k+1}} \right)^{1/n_s} - \left( \frac{p_{0e}}{p_i^k} \right)^{1/n_s} \right) \quad (35)$$

Seguindo a mesma metodologia, a integração implícita para o caso da velocidade de fuga para um aliviador resistivo, e o balanço de massa no volume, Equações (20) e (21) são dados por:

$$V_{vr,i}^{k+1} = \sqrt{\frac{p_i^{k+1} - p_{0r}}{K_r}} \quad (36)$$

$$V_{esq,i}^{k+1} = V_{v,j}^{k+1} + V_i^{k+1} \quad (37)$$

### 3.5 Procedimento de Cálculo

Ambos os sistemas de equações para a tixotropia, Equações (32) a (34), e para as equações governantes, Equações (26) a (31), são função da tensão de cisalhamento no volume de controle no tempo a ser calculado. Portanto, a tensão de

cisalhamento deve ser calculada iterativamente de forma que a velocidade média, presente em ambos os grupos de equações, apresente o mesmo valor. Para tanto define-se um resíduo da velocidade a ser minimizado:

$$R_v = V_t - V_g \quad (38)$$

em que  $R_v$  é o resíduo da velocidade. Os índices  $t$  e  $g$  fazem referência ao cálculo da velocidade média pela integração radial do modelo da tixotropia, e pela resolução das equações governantes pelo Método das Características, respectivamente.  $V_t$  é calculado pelas equações (26) a (29) para um volume de controle sem aliviador de pressão.  $V_g$  é calculado pelas equações (32) a (34).

Para um volume de controle com aliviador de pressão, o sistema de equação a ser resolvido é mais complexo. Como discorrido na Seção 3.4.2, tais volumes de controle possuem não somente um, e sim dois pares de velocidade média axial e tensão de cisalhamento, um na fronteira esquerda e outro na fronteira direita do volume. Além disso, o volume de controle possui uma velocidade vertical de fuga do fluido para dentro do aliviador de pressão, e também a variável pressão, considerada constante em todo o volume.

As seis variáveis envolvidas no cálculo de um volume de controle possuidor de aliviador de pressão – dois pares velocidade média-tensão de cisalhamento, velocidade vertical de fuga e pressão – possuem seis equações para sua resolução. As equações (30) e (31), provenientes da discretização das equações governantes do problema físico, são empregadas. Além destas, a equação (34) do modelo de tixotropia é empregada duas vezes, uma para cada velocidade média de cada fronteira lateral do volume de controle. A velocidade de fuga do fluido é por sua vez calculada pela equação (35) ou (36), dependendo do tipo de aliviador de pressão. Por fim, o balanço de massa do volume de controle, (37), completa a sexta equação do sistema. Para a resolução desse sistema de equações, o resíduo a ser minimizado é o da pressão:

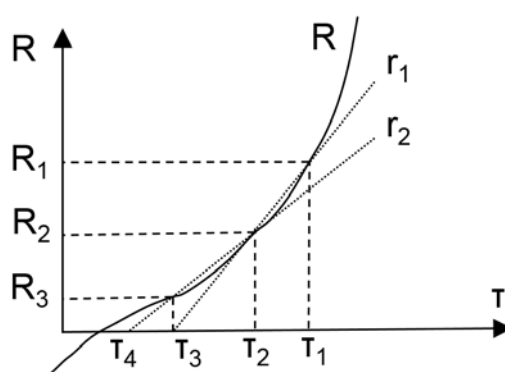
$$R_p = p_1 - p_2 \quad (39)$$

em que  $R_p$  é o resíduo da pressão. A variável calculada iterativamente é a tensão de cisalhamento na fronteira esquerda do volume de controle,  $\tau_{w,ent}$ . Inicialmente a

equação do modelo de tixotropia (34) aplicada na fronteira esquerda do volume fornece a velocidade média nessa fronteira em função de  $\tau_{w,ent}$ . A pressão  $p_1$  é então obtida utilizando da velocidade média na fronteira esquerda e a equação discretizada (30).

Em uma segunda etapa a pressão  $p_1$  é utilizada para obter a velocidade de entrada de fluido para dentro do aliviador, Equação (35) ou (36). A velocidade média na fronteira direita do escoamento é então calculada pelo balanço de massa do escoamento, Equação (37). Essa velocidade média é então utilizada para a obtenção da tensão média na mesma fronteira, Equação (34) aplicada à fronteira direita do volume. Com tais informações, a equação discretizada (31) é então empregada para o cálculo da pressão  $p_2$  em função das demais variáveis obtidas pela pressão  $p_1$ . Quando o resíduo  $R_p$  aproxima-se de zero o sistema de equação foi resolvido, pois a pressão calculada por dois caminhos distintos obteve valores próximos.

Para o cálculo iterativo de  $\tau_w$  de forma a reduzir  $R_V$ ; e de  $\tau_{w,esq}$  de forma a reduzir  $R_p$ , o método da secante é utilizado. O método é exibido na Figura 9, com a variável  $R$  sendo usada genericamente para  $R_V$  ou  $R_p$ , e  $\tau$  sendo usado genericamente para  $\tau_w$  ou  $\tau_{w,esq}$ .

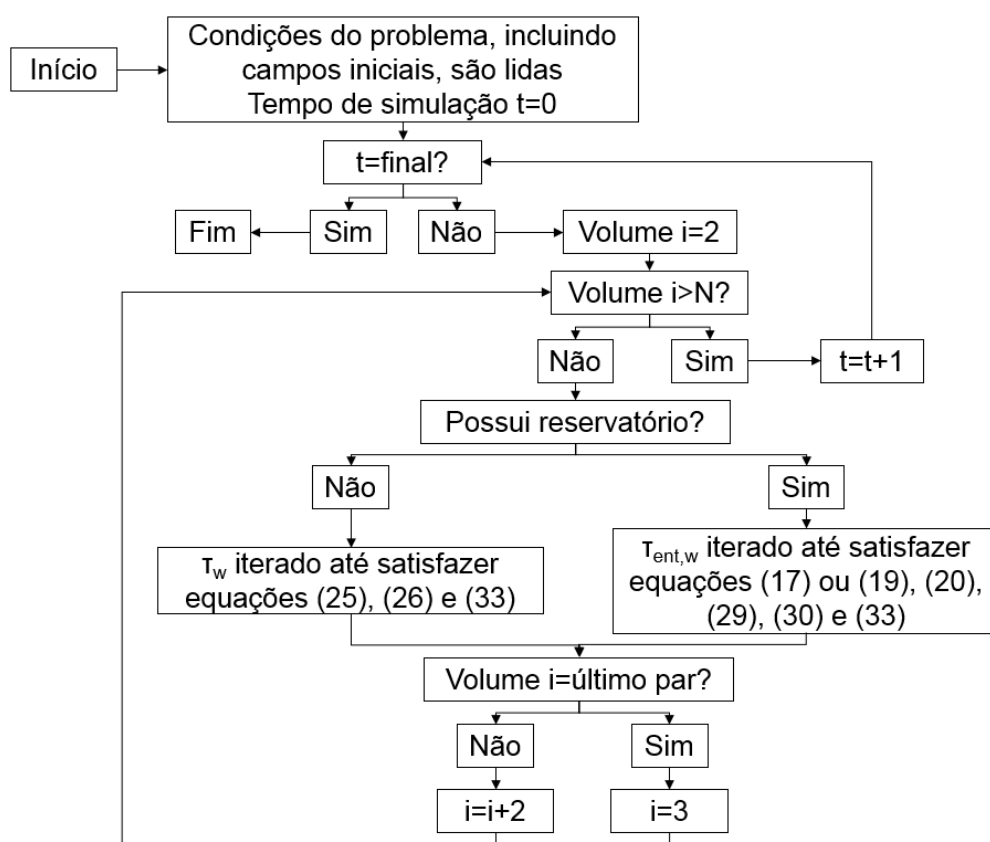


**Figura 9. Ilustração do método da secante para estimar valores para  $\tau$  em função do resíduo.**

Objetiva-se com o método da secante encontrar ou se aproximar da raiz da curva  $R$ . Inicialmente, um par de valores,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  na Figura 9, são atribuídos para a tensão de cisalhamento. Para cada valor de tensão de cisalhamento o resíduo é calculado. Uma secante é então traçada, reta  $r_1$  na figura, de forma a encontrar uma

nova estimativa para  $\tau_w$ ,  $\tau_{w3}$ . O processo de traçar secantes é repetido até que o resíduo esteja abaixo do critério estabelecido para a velocidade, ou até que a quantidade de iterações atinja seu valor limite, como será abordado no próximo capítulo.

Um programa em linguagem Fortran foi desenvolvido para a resolução dos sistemas de equações de todos os volumes de controle do problema. Como descrito na Seção 1.3, as respostas da ferramenta computacional são os campos de pressão e vazão obtidos para diferentes instantes de tempo. Para tanto, a resolução do sistema é feita pelos processos iterativos utilizando do método da secante, descrito nos parágrafos anteriores. A Figura 10 apresenta o algoritmo lógico para o procedimento de cálculo. Na figura,  $N$  representa a quantidade total de volumes de controle na tubulação. Como pode-se deduzir da figura, para cada tempo de simulação todos os volumes são calculados, respeitando a ordem de calcular primeiramente volumes pares e em seguida volumes ímpares, conforme o método das características descrito na Seção 3.4.1.



**Figura 10. Algoritmo lógico para o procedimento de cálculo do modelo numérico.**

### 3.6 Adimensionalização

O estudo da análise adimensional do modelo matemático é útil para simplificar a análise dos resultados, por reduzir a quantidade de variáveis de influência no sistema. Também para que os resultados obtidos possam ser analisados em diferentes escalas geométricas. É importante destacar que a análise adimensional é somente utilizada para a apresentação dos resultados, pois a simulação numérica é realizada com a resolução das equações na forma dimensional.

Os fatores adimensionais podem ser classificados como constantes e variáveis. Os fatores constantes definem os parâmetros de simulação e são obtidos pelo agrupamento de constantes do problema, presentes nas equações do modelo para a tixotropia. As variáveis adimensionais, por sua vez, apresentam formas simplificadas de compreender as variáveis físicas do problema. As Tabelas 2 e 3 apresentam os fatores adimensionais constantes e variáveis adimensionais, respectivamente.

**Tabela 2 – Fatores adimensionais constantes.**

$t_{eq}^* = t_{eq}(c/l)$	$G_0^* = G_0 l / (\tau_{yd} d)$	$\phi = \rho c d^2 / (4\eta_\infty l)$
$\tau_y / \tau_{yd}$	$\dot{\gamma}_{yd} / (c/d)$	$\eta_\infty(c/d) / \tau_{yd}$
$\eta_0(c/d) / \tau_{yd}$	$K\tau_{yd}^{n-1} / \eta_\infty^n$	

Os fatores  $t_{eq}^*$  e  $G_0^*$  representam, respectivamente, o tempo adimensional característico para a recuperação estrutural do fluido e o módulo adimensional de elasticidade para o fluido totalmente estruturado. A variável  $\phi$ , por sua vez, representa a relação entre a inércia da onda de pressão e a dissipação viscosa, como discutido por Oliveira (2010).

As escalas utilizadas para a adimensionalização utilizam do comprimento da tubulação  $l$ , o diâmetro do tubo  $d$ , e a velocidade de propagação de onda  $c$ . São portanto escalas dimensionais para velocidade e comprimento em função das constantes do problema, enquanto que as razões  $c/d$  e  $c/l$  apresentam escalas dimensionais para o tempo.

**Tabela 3 – Variáveis adimensionais.**

Definição	Equação
$p^* = 1$ representa o equilíbrio entre a tensão limite de escoamento dinâmica e a pressão na entrada do escoamento.	$p^* = p / (4\tau_{yd} l / d)$ (40)
Número de Mach local.	$v^* = v / c$ (41)
Número de Mach médio.	$V^* = V / c$ (42)
Vazão volumétrica adimensional, obtida comparando-se à vazão de equilíbrio ou regime permanente.	$Q^* = Q / Q_{eq}$ (43)
Tempo adimensional. Tempo necessário para a onda de pressão se propagar ao longo da tubulação.	$t^* = t(c / l)$ (44)
Coordenada longitudinal adimensional.	$z^* = z / l$ (45)
Coordenada radial adimensional.	$r^* = 2r / d$ (46)

É importante notar que a velocidade axial média é adimensionalizada utilizando da velocidade de propagação de onda  $c$ . Porém, para a simplificação dos resultados de verificação do modelo, Capítulo 4, a vazão volumétrica é adimensionalizada em função da vazão de regime permanente. Portanto, para a verificação do modelo os valores para a vazão volumétrica adimensional apresentam ordem de 1. O mesmo não é observado para o Capítulo 5 de discussão e resultados, que utiliza da velocidade axial para a apresentação dos resultados. As equações adimensionais governantes do problema podem então ser escritas:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t^*} + \phi \left( \frac{\eta_{\infty} c}{\tau_{yd} d} \right) \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \quad (47)$$

$$\phi \left( \frac{\eta_{\infty} c}{\tau_{yd} d} \right) \frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial p^*}{\partial z^*} + \tau_w^* = 0 \quad (48)$$

As equações (17) e (19) evidenciam que a dinâmica do fluido adentrando aliviadores é função do volume total do aliviador  $Vol_{te}$  ou  $Vol_{tr}$  – que pode ser chamado genericamente de  $Vol_t$  –, da pressão do gás confinado caso o mesmo ocupasse todo o volume do aliviador de pressão tipo êmbolo,  $p_{0e}$ , e da resistência



hidráulica do aliviador tipo resistivo,  $K_r$ . A Tabela 4 a seguir apresenta simplificações adimensionais para essas variáveis.

**Tabela 4 – Fatores adimensionais relativos aos aliviadores de pressão.**

Definição	Equação
Volume adimensional do aliviador.	$Vol_t^* = Vol_t / (\pi d^2 / 4) \quad (49)$
Pressão adimensional do gás confinado caso ele ocupasse todo o volume do aliviador.	$p_{0e}^* = p_{0e} / (4\tau_{yd} l / d) \quad (50)$
Velocidade vertical adimensional do aliviador tipo resistivo.	$V_{vr}^* = V_{vr} / c \quad (51)$
Resistência hidráulica adimensional à entrada de fluido para dentro do aliviador resistivo.	$K_r^* = K_r c^2 / (4\tau_{yd} l / d) \quad (52)$

## 4 VERIFICAÇÃO DO MODELO

Aborda-se no corrente capítulo a verificação do código, e os critérios de convergência e da malha utilizadas na simulação numérica. Inicialmente, um caso simplificado do problema, com fluido newtoniano, é comparado com sua solução analítica para a avaliação da malha utilizada. Em uma segunda etapa, a quantidade de iterações para o cálculo da vazão é estudada.

### 4.1 Comparação com Solução Analítica

#### 4.1.1 Comparação com Solução Analítica para Pressão Fixa na Entrada

Para a simulação com pressão fixa  $p^*=1$  na entrada, tem-se a seguinte solução analítica do problema newtoniano (Oliveira, 2011):

$$p^*(z^*, t^*) = (1 - z^*) - 2e^{-\frac{t^*}{2\beta}} \sum_{s=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{\Omega_s} \text{sen}(\Omega_s z^*) \left( \cos(\omega_s t^*) + \frac{1}{2\beta\omega_s} \text{sen}(\omega_s t^*) \right) \right] \quad (53)$$

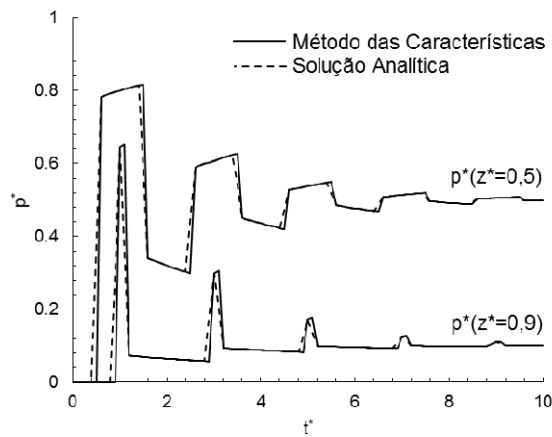
$$Q^*(z^*, t^*) = \frac{2e^{-\frac{t^*}{2\beta}}}{\beta} \sum_{s=1}^{\infty} \left( \frac{1}{\omega_s} \cos(\Omega_s z^*) \text{sen}(\omega_s t^*) \right) + \left( 1 - e^{-\frac{t^*}{\beta}} \right) \quad (54)$$

em que  $s$  é um número inteiro,  $\Omega_s = s\pi$  e  $\omega_s^2 = \Omega_s^2 - 1/(4\beta^2)$ . A variável  $\beta$  representa o efeito relativo entre a propagação de onda e a dissipação viscosa, dado por:

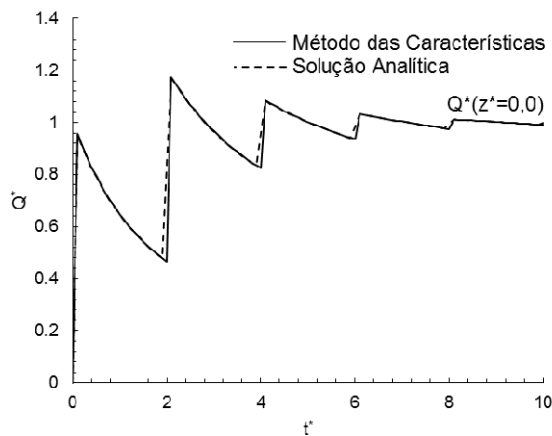
$$\beta = \frac{\rho c d^2}{32\eta l} \quad (55)$$

O fator de  $\beta=1$ , a condição de contorno de  $p^*=1$  na entrada e o tempo adimensional de simulação de 10 são fixados. É simulado um caso Newtoniano pelo método das características com  $N=100$  volumes de controle no sentido axial. O passo de tempo adimensional para a simulação é de  $t^*=0,02$ . Vale recordar que pelo método das características empregado, Figura 8, o passo de tempo é função do passo geométrico, e portanto do valor eleito para  $N$ . Esta simulação compreende o reinício de escoamento de fluido newtoniano em um tubo de comprimento  $l$  e diâmetro  $d$ , sendo que inicialmente ambas pressão e vazão assumem valor zero para todas as posições no tubo. A solução analítica é obtida com o somatório de  $s$

variando entre 1 e 10.000. A comparação da simulação pelo método das características e a solução analítica é apresentada na Figura 11.



(a)



(b)

**Figura 11. Comparação de (a) pressão e (b) vazão para a simulação com o método das características e a solução analítica, com pressão fixa na entrada.**

Analisando a solução analítica da Figura 11-a o comportamento da pressão no interior do tubo durante o reinício de escoamento pode ser analisado. Picos de pressão ocorrem em curvas referentes a diferentes posições na tubulação em diferentes tempos. Partindo da condição inicial de zero, a pressão apresenta seu primeiro pico na medida que a onda de pressão atinge a posição  $z^*$  estudada. Portanto, a pressão em  $z^*=0,9$  cresce a partir de zero ao redor do tempo adimensional de 1, pois esse tempo é o necessário para que a onda de pressão

chegue ao fim da tubulação. Após o pico inicial a pressão em diferentes curvas oscila até que uma relativa estabilização ocorra para  $t^*=10$ .

Estudando a solução analítica da Figura 11-b, por sua vez, pode-se entender melhor o comportamento da vazão volumétrica na entrada do tubo no reinício do escoamento. A vazão sofre aumentos abruptos para cada momento em que a onda de pressão atinge a posição de entrada da tubulação. Por isso, cada aumento abrupto da velocidade ocorre para o tempo de propagação e reflexão de onda, de dois tempos adimensionais. A vazão apresenta um decrescimento contínuo entre cada crescimento brusco, até a estabilização em  $t^*=10$ .

Os resultados obtidos pela simulação com o Método das Características aparentam ser satisfatórios. A simulação acompanha os valores analíticos para os picos de pressão e velocidade, e os valores para o regime permanente. Deve ser notado que, apesar da boa correlação entre as curvas, as curvas obtidas pelo Método das Características apresentam pontos localizados em que se distanciam dos valores da solução analítica.

Exemplo de um destes casos falhos é o crescimento para o primeiro pico de pressão da curva  $z^*=0,5$ . O resultado da simulação pelo método das características apresenta um valor de zero até o momento de  $t^*=0,6$ . Porém, pela solução analítica há um valor médio entre a pressão em zero e o pico de pressão para  $t^*=0,5$ . Tal atraso do modelo proposto utilizando o Método das Características não deve, porém, trazer grandes incertezas à simulação, como será evidenciado na Seção 4.1.2, que contém o desvio médio entre as curvas de simulação e da solução analítica para diferentes casos.

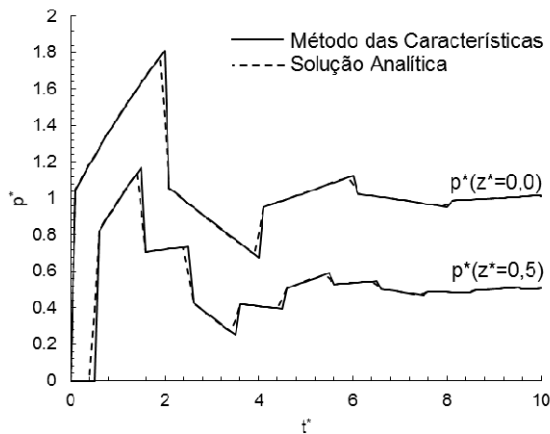
#### **4.1.2 Comparação com Solução Analítica para Vazão Fixa na Entrada**

Para a simulação com vazão fixa na entrada,  $Q^*(0,t^*)$  é igualado a 1. Esse valor corresponde à  $p^*(0,t^*)=1$  em regime permanente. A solução analítica para este caso, conforme apresentado por Oliveira (2011) é dada por:

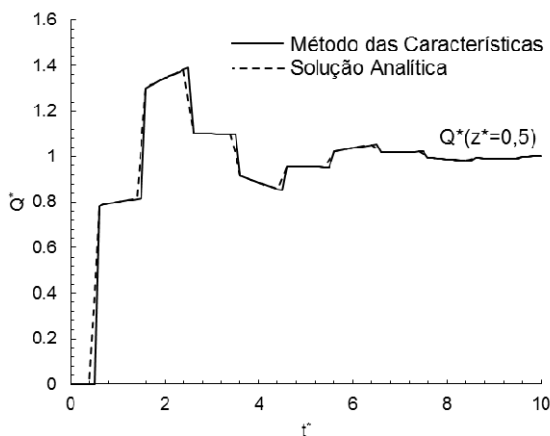
$$p^*(z^*, t^*) = (1 - z^*) + 2\beta e^{-\frac{t^*}{2\beta}} \sum_{s=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\Omega_s^2} \cos(\Omega_s z^*) \left[ \left( \omega_s - \frac{1}{4\beta^2 \omega_s} \right) \text{sen}(\omega_s t^*) - \frac{1}{\beta} \cos(\omega_s t^*) \right] \right\} \quad (56)$$

$$Q^*(z^*, t^*) = 1 - 2e^{-\frac{t^*}{2\beta}} \sum_{s=1}^{\infty} \left( \frac{1}{\Omega_s} \text{sen}(\Omega_s z^*) \left( \cos(\omega_s t^*) + \frac{1}{2\beta \omega_s} \text{sen}(\omega_s t^*) \right) \right) \quad (57)$$

em que  $s$  é um número inteiro,  $\Omega_s = (2s-1)\pi/2$  e  $\omega_s^2 = \Omega_s^2 - 1/(4\beta^2)$ . O fator de escoamento de  $\beta=1$ , a condição de contorno de  $Q^*=1$  na entrada, e o tempo adimensional de simulação de 10 são fixados. Novamente, a solução analítica é obtida com o somatório de  $s$  variando entre 1 e 10.000. A comparação entre o caso newtoniano simulado pelo método das características com 100 volumes de controle no sentido axial e a solução analítica apresentada na Figura 12.



(a)



(b)

**Figura 12. Comparação de (a) pressão e (b) vazão para a simulação com o método das características e a solução analítica, com vazão fixa na entrada.**

Na Figura 12-a são apresentados as curvas de pressão para  $z^*=0,5$  e  $0,9$ , enquanto a Figura 12-b contém a curva para a vazão no ponto médio do tubo. Para a condição de vazão fixa na entrada do tubo, pode-se observar comportamento similar à pressão fixa. Novamente a pressão e a vazão apresentam crescimentos bruscos para quando a onda de pressão atinge as posições  $z^*$  estudados. Tais crescimentos são seguidos de reduções em um padrão oscilatório até o regime permanente. Novamente a simulação numérica através do Método das Características apresenta um resultado fidedigno porém levemente atrasado quando comparado à solução analítica.

A Tabela 5 apresenta o desvio absoluto médio de  $p^*$  e  $Q^*$  entre casos de simulação numérica pelo método das características e a solução analítica. O desvio absoluto médio é calculado pelo somatório da diferença em absoluto de cada variável para cada ponto em  $t^*$ . Foram utilizados 100 valores equidistantes em  $t^*$  para cada simulação até  $t^*=10$ . Pode-se observar que, apesar do atraso evidenciado na Figura 11 e na Figura 12, a simulação numérica pelo método das características com 100 volumes de controle apresenta um desvio médio baixo, de no máximo 0,010 para  $Q^*$  ou  $p^*$ , quando comparada à solução analítica. A quantidade de 100 volumes de controle no sentido axial é portanto fixa para o restante das simulações do corrente trabalho.

**Tabela 5 – Desvio médio absoluto entre valores de pressão e vazão obtidos por simulações com método das características e suas soluções analíticas.**

Condição de contorno	Diferença absoluta média de $p^*$	Diferença absoluta média de $Q^*$
Pressão fixa na entrada	0,010	0,007
Vazão fixa na entrada	0,009	0,010

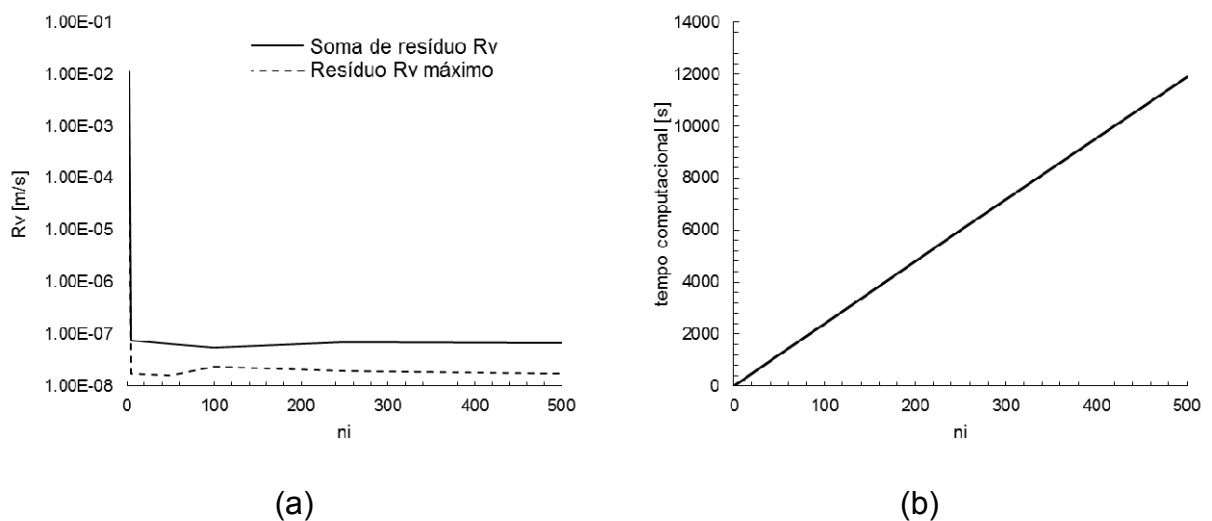
#### 4.2 Verificação do Critério de Convergência para a Vazão

Como discutido no capítulo anterior, para as simulações com fluido tixotrópico faz-se necessário o cálculo iterativo da tensão de cisalhamento na parede para a obtenção da vazão em cada volume de controle. A iteração é realizada, como

previamente descrito, pelo Método da Secante, e seu critério de parada e malha radial serão agora discutidos.

Para a corrente seção, a abordagem Newtoniana é abandonada, e o modelo tixotrópico completo será avaliado. As simulações apresentadas ocorrem com  $N=100$  volumes de controle no sentido axial, passo de tempo de  $t^*=0,02$ ,  $M=20$  volumes de controle no sentido radial, e pressão fixa na entrada em  $p^*=1$ . Fixados tais parâmetros, resta variar a quantidade  $n_i$  de iterações permitidas para o cálculo da vazão pelo método da secante. Novamente, o problema físico simulado é o de um tubo com fluido em repouso tendo o escoamento reiniciado. A diferença para casos anteriormente apresentados é a de que o fluido é tixotrópico e encontra-se gelificado no início do escoamento, demais parâmetros geométricos mantêm-se.

O escoamento tixotrópico ocorre com parâmetros adimensionais  $t_{eq}^* = t_{eq}(c/l) = 1,0$ ,  $G_0^* = G_0 l / (\tau_{yd} d) = 10^4$ ,  $\phi = \rho c d^2 / (4\eta_\infty l) = 10,0$ ,  $\tau_y / \tau_{yd} = 1,0$ ,  $\dot{\gamma}_{yd} / (c/d) = 10^{-8}$ ,  $\eta_\infty(c/d) / \tau_{yd} = 10^2$ ,  $\eta_0(c/d) / \tau_{yd} = 10^{11}$ ,  $K\tau_{yd}^{n-1} / \eta_\infty^n = 10,0$ . Demais constantes do modelo de tixotropia são  $n = 0,5$ ,  $m = 1,0$ ,  $a = 1,0$ ,  $b = 1,0$ . A escolha dos parâmetros é realizada levando-se em conta os casos-referências que serão discutidos na Seção 5.1. A Figura 13 apresenta o efeito da quantidade  $n_i$  de iterações permitida para o cálculo da vazão nos resíduos numéricos de velocidade,  $R_v$ , Equação (38), e no tempo computacional.



**Figura 13. Efeito da quantidade  $n_i$  de iterações para (a) resíduos em  $t^*=2,0$  e (b) tempo computacional de simulação.**

A Figura 13-a aborda especificamente os resíduos, obtidos pela Equação (38). No caso, a soma dos resíduos é o somatório para todos os volumes de controle axiais, para a simulação em  $t^*=2,0$ . O resíduo máximo obtido para tal instante de tempo é também plotado. Pode-se observar que o acréscimo de  $n_i$  a partir de 5 não vem a causar ganhos significativos quanto aos resíduos da simulação. Para  $n_i=5$  tem-se a soma dos resíduos e o resíduo máximo já na casa de  $1.E-07$  e  $1.E-08$ , respectivamente. Isso ocorre pelo método da secante necessitar de poucas iterações para aproximar-se da raiz da função resíduo.

A Figura 13-b, por sua vez, apresenta a influência de  $n_i$  no tempo computacional necessário para a simulação de  $t^*$  até 10. O tempo computacional é obtido para um computador portátil provido de processador Intel® Core™ i7-3610QM CPU @ 2,30 GHz e 8,00 GB de memória RAM. Pode-se observar que o tempo computacional é função linear de  $n_i$ . Dado que valores baixos como 5 para  $n_i$  já são suficientes para resíduos inferiores a  $10^{-5}$  m/s e a dependência direta do tempo computacional em relação a  $n_i$ , um resíduo máximo de  $10^{-6}$  m/s e iteração máxima de 100 são eleitos para o modelo.

O critério de parada para a resolução iterativa dos volumes de controle com aliviadores de pressão seguiu um critério similar. Foi assumido que variações de pressão no interior do volume de controle não viriam a interferir na modelagem. Portanto um resíduo máximo de  $10^{-1}$  Pa foi atribuído, e  $n_i=1000$ .



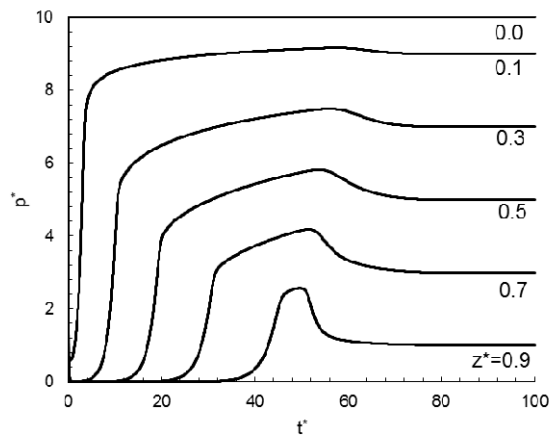
## 5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos utilizando a ferramenta computacional desenvolvida. Inicialmente, a seção 5.1 apresentará os casos-referências simulados. Os casos-referências são obtidos com simulações de reinício de escoamento que não consideram o efeito da variação temporal do módulo elástico do fluido ou aliviadores de pressão na tubulação. São úteis para avaliar nas Seções 5.2, 5.3 e 5.4 a influência da introdução de tais elementos.

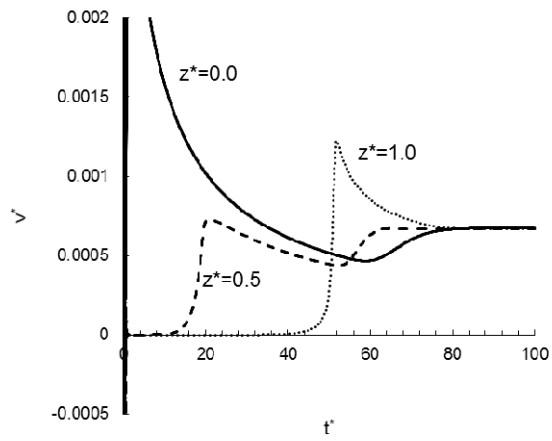
### 5.1 Casos-referências

O reinício de escoamento de fluidos gelificados pode ser compreendido por duas perspectivas: (i) determinando-se a mínima pressão de entrada necessária para superar a tensão limite e portanto ocasionar o escoamento do fluido e (ii) a determinação da pressão máxima resultante da aplicação de uma vazão imposta na entrada, sendo a segunda abordagem a mais comumente observada em aplicações reais (Oliveira e Negrão, 2014). Portanto, de forma a abordar as duas perspectivas o corrente trabalho apresenta dois casos-referência, que não consideram o efeito da variação temporal do módulo elástico ou aliviadores de pressão na tubulação. O primeiro caso utiliza a condição de contorno de pressão fixa na entrada do tubo durante o reinício de escoamento, e o segundo caso utiliza de vazão fixa na entrada do tubo.

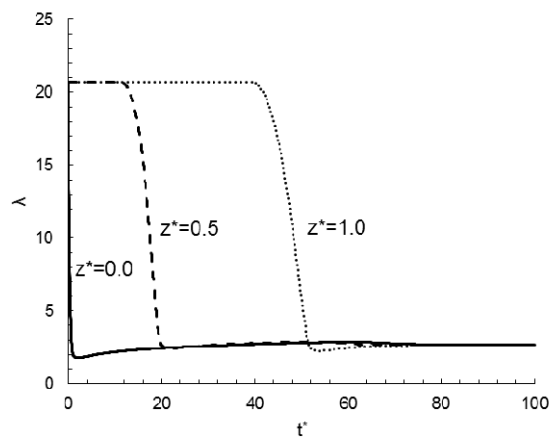
Inicialmente, os valores adimensionais utilizados são os mesmos empregados na Seção 4.2, com a única exceção sendo  $\phi = \rho c d^2 / (4\eta_{\infty} l) = 1,0$ . A pressão é considerada fixa na entrada, em  $z^* = 0,0$ , e igual a  $p^*(0, t^*) = p / (4\tau_{yd} l / d) = 10$ , ou seja, 10 vezes maior que a pressão necessária para fazer equivaler a tensão de escoamento dinâmica. A Figura 14 apresenta a evolução no tempo das variáveis de saída de pressão, velocidade longitudinal e parâmetro estrutural  $\lambda$ , para o caso de pressão fixa na entrada. O tempo de simulação é definido como 100 unidades de tempo adimensional.



(a)



(b)



(c)

Figura 14. Evolução de (a) pressão, (b) velocidade longitudinal e (c) parâmetro estrutural para o caso-referência e pressão fixa na entrada.

Como pode-se observar na Figura 14-a, a pressão no duto varia de seu valor inicial zero até um valor que pode ser considerado constante em  $t^* \sim 80$  para as diferentes posições axiais. Para  $z^*=0,0$ , a pressão mantém-se no valor adimensional de 10 durante toda a simulação, por ter sido fixa na condição de contorno de entrada. Para as pressões avaliadas em diferentes posições  $z^*$  na tubulação, porém, a pressão cresce continuamente até atingir seu pico entre os tempos adimensionais 50 e 70. Após o pico de pressão, para cada posição  $z^*$ , a pressão então reduz-se ao seu valor de equilíbrio ao final da simulação.

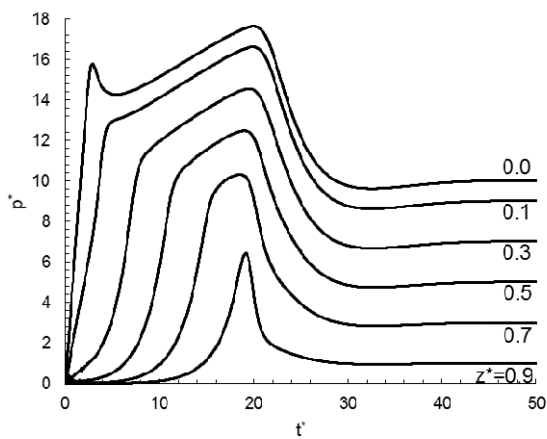
As Figura 14-b e c, por sua vez, evidenciam que durante a etapa inicial de reinício de escoamento, que precede os picos de pressão, o fluido é desestruturado e a velocidade cresce. A curva  $z^*=0,5$ , por exemplo, apresenta crescimento acentuado de pressão partindo de zero ao redor do tempo adimensional 18. Isso representa, no mesmo instante, o crescimento da velocidade, e redução do parâmetro estrutural, nos seus respectivos gráficos, até valores próximos aos de regime permanente.

Após o crescimento acentuado de pressão partindo de zero evidenciado para diferentes coordenadas axiais, a velocidade e o parâmetro estrutural apresentam diferentes evoluções com o tempo. O parâmetro estrutural mantém-se reduzido e relativamente constante para todos os pontos estudados após sua redução brusca. A velocidade axial, por sua vez, pode após o crescimento durante a elevação de pressão, reduzir-se continuamente até a velocidade de equilíbrio, como é o caso de  $z^*=1,0$ , ou sofrer uma redução e posterior acréscimo até a velocidade de regime permanente, como é o caso para  $z^*=0,5$ . O comportamento oscilatório para a velocidade axial também havia sido observado para escoamento com fluido Newtoniano, e tem sua origem nas ondas de pressão do sistema.

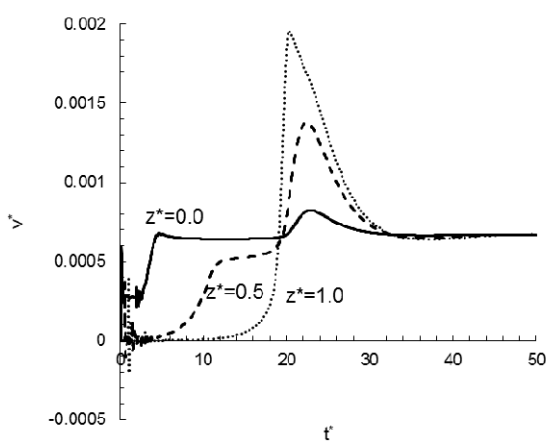
Para a segunda condição de contorno, a vazão é fixa na entrada. A vazão na entrada é definida como a vazão que em regime permanente permite uma pressão de equilíbrio na entrada,  $z^*=0,0$ , de  $p^*=10$ , tal qual o caso-referência anterior. O valor numérico para a vazão na condição de vazão fixa na entrada foi obtido do regime permanente na simulação com condição de contorno de pressão fixa. O tempo de simulação é definido como 50 unidades de tempo adimensional, pois tal intervalo permite a observação do escoamento até um estado de equilíbrio.

A Figura 15 apresenta novamente a evolução no tempo das variáveis de saída de pressão, velocidade longitudinal e parâmetro estrutural  $\lambda$ , para o caso de vazão fixa na entrada. Os mesmos fatores adimensionais e constantes usadas para o caso-referência anterior são utilizados, com a exceção de fixar a variável adimensional  $\phi = \rho c d^2 / (4\eta_{\infty} l) = 10,0$ . Essa escolha de parâmetros permite que a simulação obtenha um pico de pressão acentuado para a curva  $z^* = 0,0$ .

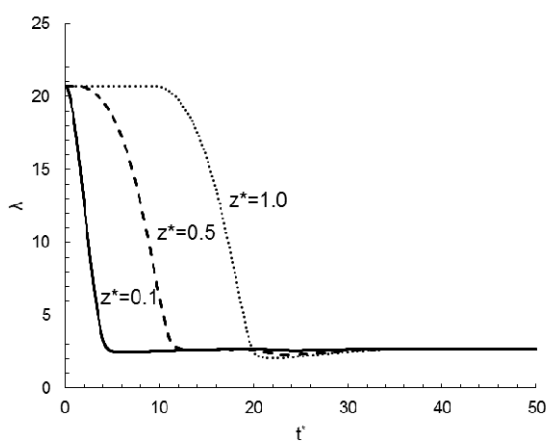
O pico de pressão na entrada da tubulação é decorrente da condição de entrada de vazão constante. Ao passo que a vazão é fixa e a pressão se ajusta ao escoamento, a pressão pode assumir valores de pico superiores ao valor de regime permanente. Esse caso-referência apresenta portanto uma oportunidade de redução de pico de pressão, posteriormente explorada pela introdução de aliviadores de pressão.



(a)



(b)



(c)

**Figura 15. Evolução de (a) pressão, (b) velocidade longitudinal e (c) parâmetro estrutural para o caso-referência e vazão fixa na entrada.**

Como pode-se observar na Figura 15-a, para o caso de vazão constante na entrada, a pressão para diferentes posições axiais também apresenta um comportamento crescimento-pico-redução. A diferença, ao comparar-se com o caso de pressão fixa na entrada, é que as pressões para o atual caso superam o valor de  $p^*=10$  anteriormente fixo como condição de contorno, e que a pressão na entrada,  $z^*=0.0$ , apresenta dois picos.

O primeiro pico de pressão representa o fluido sendo desestruturado, como observado pelo decréscimo de  $\lambda$  na Figura 15-c, durante um escoamento inicial predominantemente elástico. O segundo pico ocorre por decorrência da dissipação de energia pela quebra do gel ao longo do tubo. Ou seja, ocorre pois a vazão fixa na entrada permite um crescimento de pressão até que o fluido em toda a tubulação venha a ser desestruturado, e o escoamento se desenvolva, aliviando a pressão na entrada. Tal segundo pico em  $t^*=20$  e  $z^*=0.0$  apresenta o maior valor de pressão para a simulação de tal caso-referência.

Para o parâmetro estrutural  $\lambda$ , o comportamento do caso-referência de vazão constante é similar ao do caso-referência de pressão constante. O fluido apresenta uma desestruturação no momento em que há um crescimento de pressão a partir do valor inicial, e  $\lambda$  mantém-se aproximadamente constante até o equilíbrio do escoamento.

Para a velocidade, há também um crescimento significativo durante o momento de quebra da estrutura do material, porém novamente se observa que o comportamento da velocidade axial até atingir seu valor de equilíbrio pode se diferenciar entre diferentes coordenadas axiais. Ao passo que a velocidade em  $z^*=1,0$  apresenta um decréscimo contínuo após o pico da velocidade, até seu valor final em equilíbrio, o comportamento é oscilatório para as outras coordenadas axiais estudadas.

Vale comentar que para ambos os casos-referências, para tempos adimensionais próximos a zero são registradas pressões negativas. Essas respostas do programa não são necessariamente errôneas, considerando que a pressão analisada é manométrica e portanto pressões até  $p^*=-2,5$ , dados os valores empregados, possuem valores absolutos positivos. As pressões negativas no início do escoamento são resultados de ondas de pressão no regime elástico, ou seja,

etapa do reinício do escoamento em que o comportamento elástico do fluido é predominante sobre o comportamento viscoplástico. Como a análise dos valores oscilatórios iniciais não interessam ao corrente trabalho, os gráficos de pressão possuem seus eixos das ordenadas iniciando em zero, metodologia que é repetida no decorrer do trabalho para demais análises.

Vale também discorrer quanto às propriedades tixotrópicas empregadas. A seleção de parâmetros foi feita iterativamente, de forma a observar casos-referências que se presumem ser próximos à realidade. Os casos não apresentam excessivas oscilações de pressão e exibem um comportamento passível de otimização através da introdução de aliviadores. Caso fosse possível a utilização de parâmetros mensurados para o petróleo parafínico, e valores geométricos próximos aos de projeto de tubulações, evidentemente os resultados seriam mais próximos dos passíveis de observação na prática. A eleição de parâmetros será discutida na Seção 6.2, como sugestão para futuros trabalhos.

É importante também esclarecer que todas as conclusões quantitativas obtidas no decorrer do capítulo servem unicamente para o conjunto de parâmetros empregados. É esperado que conclusões qualitativas obtidas do trabalho, por sua vez, possam ser utilizadas para análises com diferentes parâmetros. Tais conclusões serão apresentadas no Capítulo 6.

Por fim é esclarecido que o foco do corrente trabalho é a análise da introdução de diferentes elementos, como aliviadores, aos casos-referências. Não se objetiva estudar a fundo os casos-referências, e suas variáveis adimensionais e constantes do modelo de tixotropia. Esse estudo está, porém, sendo desenvolvido por outros pesquisadores do CERNN – Centro de Pesquisas em Fluidos Não Newtonianos da UTFPR – e encontra-se atualmente em etapa de publicação (Oliveira e Negrão, 2014).

## **5.2 Avaliação do Efeito da Variação Temporal do Módulo Elástico**

O modelo obtido da literatura (Souza Mendes e Thompson, 2013) para o comportamento tixotrópico do fluido despreza o efeito da variação com o tempo do módulo elástico,  $G_s$ . Não sabia-se qual seria a influência para a simulação do reinício de escoamento caso a variação do módulo elástico fosse considerada. Portanto o

modelo de tixotropia foi alterado de forma a considerar ou não a variação de  $G_s$ , como evidenciado nas Equações (6-b) e (7-b).

Considerar a variação temporal do módulo elástico é inédito para um modelo de reinício de escoamento. Porém, as simulações demonstraram que sua introdução não trouxe diferenças significativas às respostas do modelo. Tanto a variável de parâmetro estrutural  $\lambda$  quanto a velocidade e a pressão não apresentaram alteração média superior a 1% em suas simulações quando comparadas aos valores obtidos para os casos-referências. Tais diferenças percentuais são calculadas obtendo a diferença absoluta entre as variáveis calculadas para o caso com e sem variação temporal do módulo elástico em todas as coordenadas axiais e tempos de simulação. Esse valor é então dividido pela média da variável durante o tempo de simulação para o caso-referência. A Tabela 6 apresenta tais alterações para as variáveis estudadas.

**Tabela 6 – Alterações médias para pressão, velocidade e parâmetro estrutural para simulação do caso-referência levando em conta a variação temporal do módulo elástico.**

Alteração média	Caso de pressão constante na entrada [%]	Caso de vazão constante na entrada [%]
$p^*$	0,17	0,37
$V^*$	0,43	0,46
$\lambda$	0,74	0,31

Conclui-se que levar em consideração a variação temporal do módulo elástico não traz consideráveis benefícios à simulação de reinício de escoamento. A abordagem é portanto relevada para o estudo posterior da introdução dos aliviadores de pressão. Não cabe tampouco inserir figuras de campos de vazão ou pressão das simulações que levaram a essa conclusão, pois tais figuras e as referentes aos casos-referências são visualmente indistinguíveis.

Vale notar que pesquisadores do CERNN – Centro de Pesquisas em Fluidos Não Newtonianos da UTFPR – possuem também uma pesquisa em andamento analisando precisamente o modelo empregado para a tixotropia, que investiga especificamente a variação no módulo elástico do fluido. Tal pesquisa não apresenta um modelo de reinício de escoamento como o apresentado no corrente trabalho,



porém poderá trazer diferentes conclusões quanto à influência da variação temporal do módulo elástico para diferentes condições de escoamento.

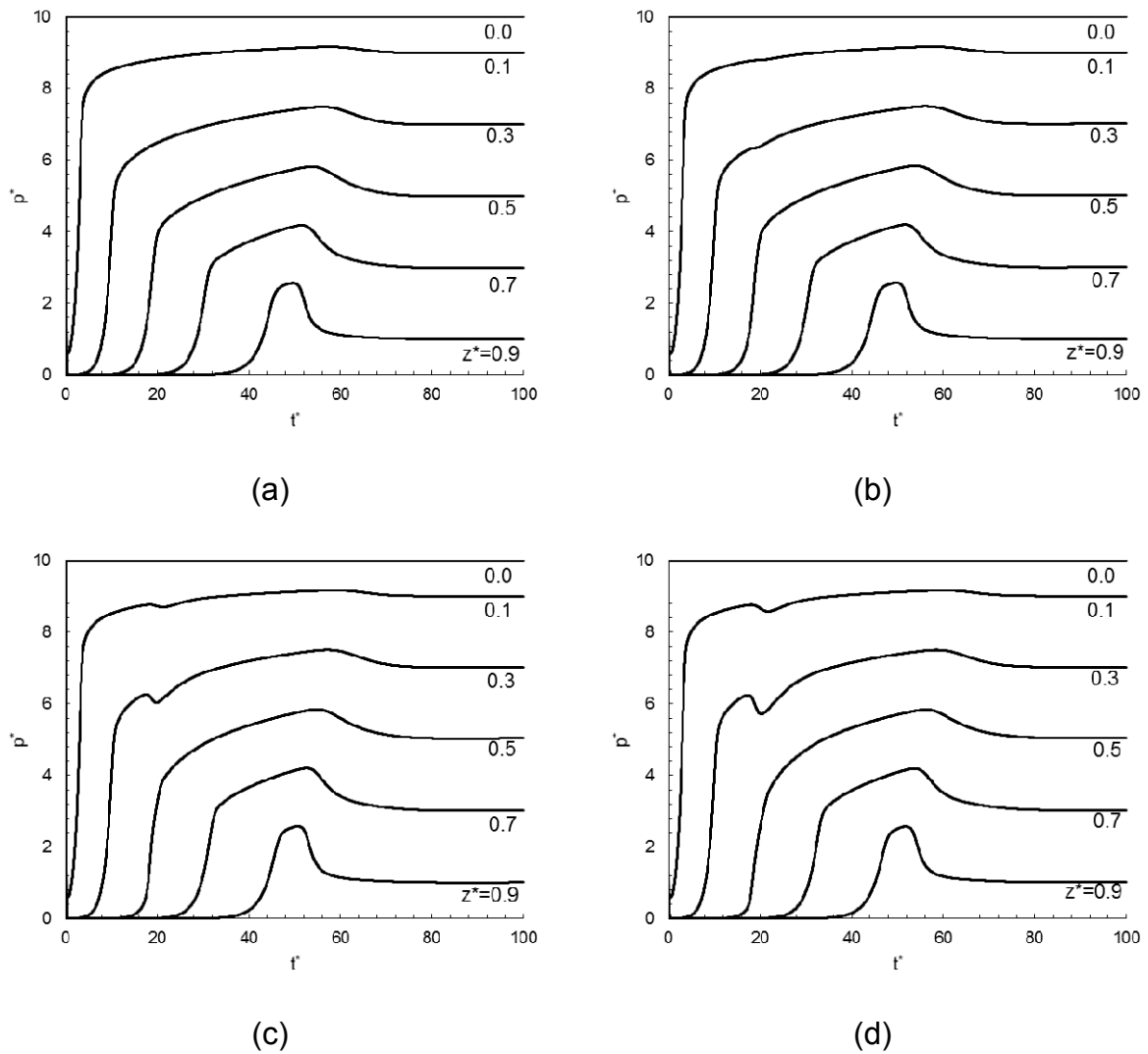
### 5.3 Avaliação da Introdução de Aliviadores tipo Êmbolo à Tubulação

É previsto que a introdução de aliviadores de pressão à tubulação, sejam eles do tipo êmbolo ou resistivo, possam causar alterações nos picos de pressão no reinício do escoamento, e no tempo de oscilações de pressão. Para avaliar esses efeitos, somente os campos de pressão resultantes das simulações com aliviadores serão estudados, pois apresentam todas as informações relevantes à análise. Para todas as simulações, as condições de escoamento são as mesmas dos casos-referências estudados. A única alteração nas simulações a seguir diz respeito à introdução dos aliviadores na tubulação.

#### 5.3.1 Aliviadores tipo Êmbolo, Pressão Fixa na Entrada da Tubulação

Para a condição de contorno na entrada de pressão fixa, não há pico de pressão que supere a condição de entrada, como observado na Seção 5.1. Portanto, a análise da introdução de aliviadores de pressão focará na influência dos aliviadores no tempo necessário para a estabilização da pressão após o reinício de escoamento.

Os testes iniciais consistem em avaliar três casos, com três diferentes volumes  $Volt^* = 0, 1\%, 0,5\%$  e  $1\%$ , para um êmbolo localizado no ponto médio da tubulação,  $z^* = 0,5$ . O volume de  $1\%$  foi eleito pois representa uma quantidade de fluido pequena em comparação à totalidade de fluido escoando no tubo. Volumes menores foram empregados para observar a influência do acréscimo no volume de reservatório até  $1\%$ . A Figura 16 apresenta os campos de pressão para as simulações. Vale observar que a Seção 3.6 lista a pressão interna no compartimento do gás do êmbolo como uma variável de influência do sistema. Porém, a pressão  $p_{0e}^*$  é fixa como zero, pois qualquer valor superior a zero faria com que o êmbolo viesse a influenciar o reinício do escoamento somente após a pressão na posição da tubulação em que o êmbolo está localizado fosse superior à pressão  $p_{0e}^*$  estabelecida. Essa situação não condiz com a idealização do aliviador como um elemento capaz de receber fluido a partir do momento inicial do reinício do escoamento, como evidenciado na Figura 3.



**Figura 16. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo êmbolo em  $z=0,5$ , e pressão fixa na entrada. (a) Caso-referência, (b)  $Vol_t^*=0,1\%$ , (c)  $Vol_t^*=0,5\%$ , (d)  $Vol_t^*=1,0\%$ .**

Como pode-se observar na Figura 16, comparando-se ao caso-referência transposto da Figura 14-a, à medida que o volume do aliviador aumenta, o comportamento da pressão se distancia do caso-referência. Para um volume adimensional de aliviador de 0,1%, Figura 16-b, a única influência evidente da introdução do aliviador é uma pequena queda de pressão em  $t^*\sim 20$ . Queda que ocorre somente para a região da tubulação anterior ao êmbolo, ou seja, com coordenada  $z^*$  inferior ou igual a 0,5.

Para maiores volumes de aliviador, Figura 16-c e d, por sua vez, a introdução do êmbolo causa uma redução maior de pressão em  $t^*\sim 20$  e um deslocamento geral

das curvas de pressão para a direita. Tal atraso para a estabilização do escoamento pode ser evidenciado através da Tabela 7, que apresenta o tempo de estabilização para caso de aliviador tipo êmbolo e pressão fixa na entrada. A variável  $\Delta t_{est}^*$  representa a alteração do tempo de estabilização comparado ao caso-referência.

**Tabela 7 – Tempo de estabilização para caso de aliviador tipo êmbolo e pressão fixa na entrada, com aliviador localizado em  $z^*=0,5$ .**

Vol <sub>t</sub> <sup>*</sup> [%]	$t_{est}^*$	$\Delta t_{est}^*$ [%]
Caso-referência	75,88	-
0,1	76,08	+0,3
0,5	77,4	+2,0
1,0	78,9	+4,0

O tempo de estabilização  $t_{est}^*$ , apresentado na Tabela 7, não deve ser compreendido como o tempo de transição entre regime transitório e permanente. O tempo  $t_{est}^*$  é definido como o momento em que todas as pressões do sistema não apresentam alteração maior que 0,1% em média, quando comparados às propriedades a uma unidade de tempo adimensional anterior.

Como observado na Tabela 7, a maior alteração no tempo de estabilização, como dedutível da Figura 16-c, é obtido para o volume adimensional de aliviador igual a 1,0%. Esse volume de aliviador proporciona um tempo de estabilização 4% maior que o caso-referência, onde não há o uso do aliviador. Isso representa que, uma implementação de um aliviador com tal volume no ponto central da tubulação acarretaria em um reinício de escoamento 4,0% mais demorado para as condições dadas de escoamento.

Os esforços do trabalho são então direcionados a avaliar para diferentes casos o aumento de tempo de estabilização. A Tabela 8 apresenta o resultado de o tempo de estabilização para os casos em que aliviadores com o mesmo volume adimensional total de 1,0% são posicionados em diferentes posições da tubulação. A variável  $z_{aliv}^*$  representa a posição adimensional  $z^*$  do aliviador de pressão. Para o caso em que mais de um aliviador é empregado, o volume total de 1,0% é igualmente dividido entre cada aliviador.

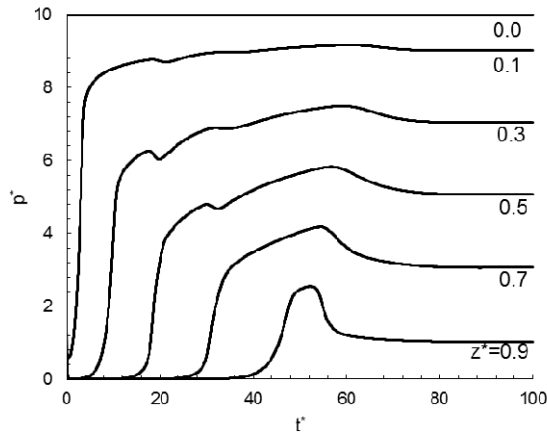
**Tabela 8 – Tempo de estabilização para aliviadores tipo êmbolo e pressão fixa na entrada, com volume adimensional total dos aliviadores de 1,0%.**

Quantidade de aliviadores	$z^*_{aliv}$	$t_{est}^*$	$\Delta t_{est}^* [\%]$
Caso-referência	-	75,88	
1	0,1	76,06	+0,2
1	0,3	77,02	+1,5
1	0,5	78,90	+4,0
1	0,7	79,34	+4,6
1	0,9	78,98	+4,1
2	0,1 e 0,3	76,58	+0,9
2	0,1 e 0,5	77,52	+2,2
2	0,1 e 0,7	77,96	+2,7
2	0,1 e 0,9	77,54	+2,2
2	0,3 e 0,5	77,94	+2,7
2	0,3 e 0,7	78,36	+3,3
2	0,3 e 0,9	77,76	+2,5
<b>2</b>	<b>0,5 e 0,7</b>	<b>79,74</b>	<b>+5,1</b>
2	0,5 e 0,9	78,50	+3,5
2	0,7 e 0,9	79,2	+4,4

Pode-se observar que o maior aumento no tempo de estabilização ocorre quando dois aliviadores, cada qual com 0,5% de  $Vol_t^*$ , são posicionados em  $z^*=0,5$  e  $0,7$ . Essa configuração da tubulação permite um tempo de reinício de escoamento até a estabilização 5,1% maior que o tempo que ocorreria caso aliviadores não fossem empregados. Resultado que respeita portanto o padrão observado que, para o escoamento estudado, aliviadores unitários ou em pares, localizados em  $z^*=0,7$ , apresentam maior tempo de estabilização quando comparados a outras posições.

A Figura 17 apresenta o campo de pressão para o caso de pressão fixa na entrada e aliviadores tipo êmbolo posicionados em  $z^*=0,5$  e  $0,7$ . Pode-se observar que, de forma similar à Figura 16, os aliviadores causam uma queda de pressão para as curvas representativas da região anterior aos mesmos no momento em que a pressão atuante sobre eles sofre um aumento significativo. No caso, duas

ocorrências são evidentes, a primeira em  $t^* \sim 20$  quando o êmbolo em  $z^* = 0,5$  atua recebendo fluido da tubulação, e o segundo em  $t^* \sim 30$ , quando o mesmo ocorre para o êmbolo em  $z^* = 0,7$ . Essa configuração de êmbolos proporciona o maior tempo de estabilização estudado para uso de êmbolos e condição de pressão fixa na entrada.

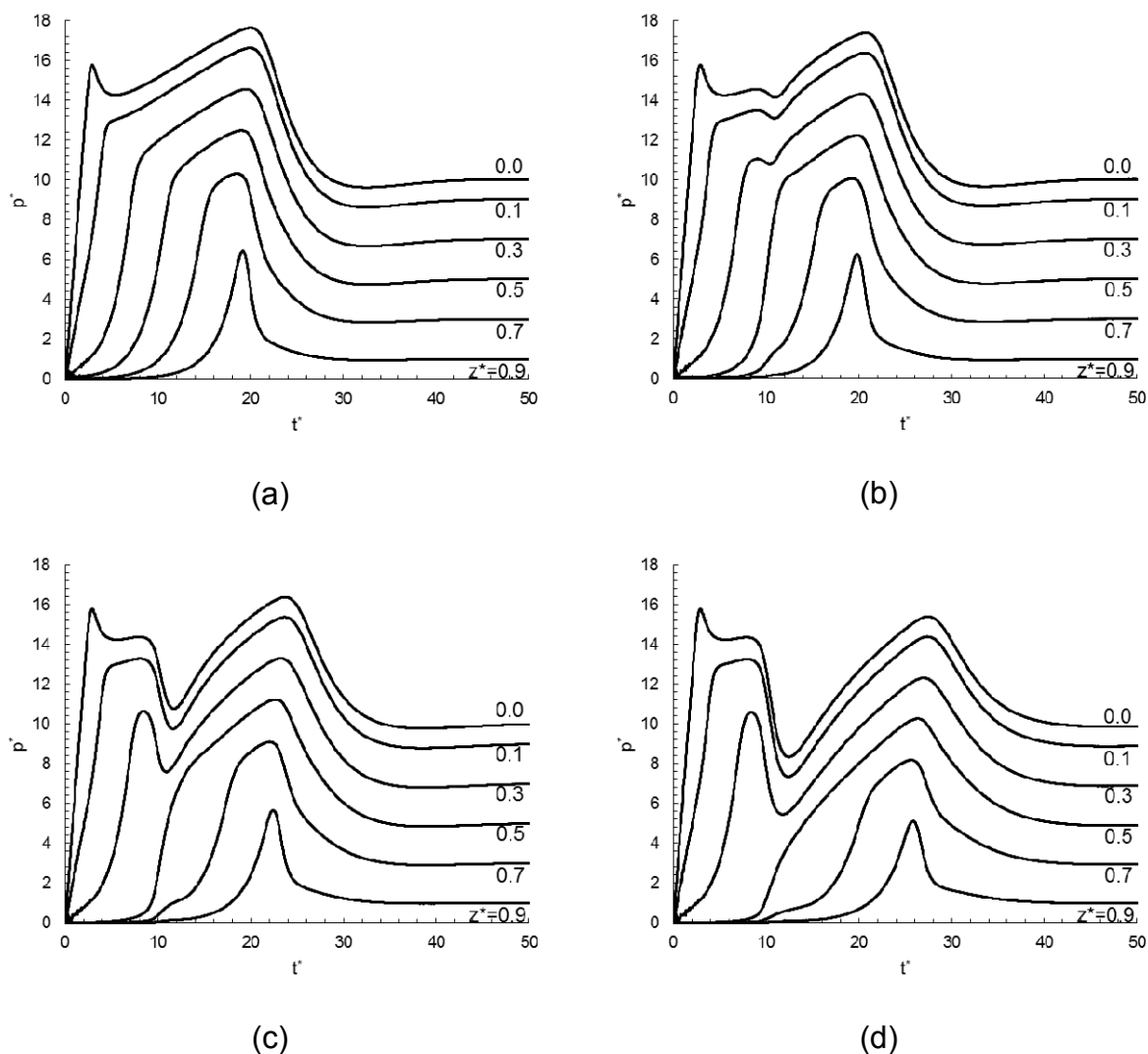


**Figura 17. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo êmbolo em  $z^* = 0,5$  e  $0,7$ , e pressão fixa na entrada, cada qual com  $Vol_t^* = 0,5\%$ .**

### 5.3.2 Aliviadores tipo Êmbolo, Vazão Fixa na Entrada da Tubulação

Para a condição de contorno de vazão fixa na entrada, há a ocorrência de picos de pressão que superam a pressão de regime permanente para a coordenada axial zero do escoamento, como observado na Seção 5.1. Por esse motivo, a análise da introdução de aliviadores focará na influência desses elementos no tempo necessário à estabilização da pressão no reinício do escoamento, e na influência para a redução dos picos de pressão.

Novamente, os testes iniciais consistem em avaliar três casos, com três diferentes volumes  $Vol_t^* = 0,1\%$ ,  $0,5\%$  e  $1\%$ , para um êmbolo localizado no ponto médio da tubulação,  $z^* = 0,5$ . A Figura 18 apresenta os campos de pressão para tais simulações.



**Figura 18. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo êmbolo em  $z^*=0,5$ , e vazão fixa na entrada. (a) Caso-referência, (b)  $Vol_t^*=0,1\%$ , (c)  $Vol_t^*=0,5\%$ , (d)  $Vol_t^*=1,0\%$ .**

Pode-se observar da Figura 18 que, novamente, à medida que o volume do aliviador aumenta o comportamento da pressão com o tempo se torna mais distante do caso-referência. O caso-referência apresenta dois picos de pressão, um inicial no tempo adimensional  $\sim 3$  e outro secundário em  $\sim 20$ , com um crescimento aproximadamente linear da pressão na coordenada  $z^*=0,0$  entre os picos. A inserção do aliviador tipo êmbolo em  $z^*=0,5$  afeta a evolução da pressão por uma queda observada entre os picos de pressão, no tempo adimensional  $\sim 10$ . A queda ocorre quando há um crescimento considerável da pressão na coordenada  $z^*=0,5$ . A queda de pressão se torna mais significativa com o aumento do volume do aliviador.

Para o decorrer da análise, faz-se necessário definir alguns conceitos relacionados a picos de pressão. Um ponto com 15 unidades adimensionais de pressão manométrica terá seu valor de pico de pressão como 5. Isso é definido pois, por ser um pico ele obrigatoriamente assume valores de pressão superiores à pressão na entrada do escoamento. Portanto, 10 unidades adimensionais de pressão, referentes à condição de contorno, são deduzidas do valor de pressão manométrica para o cálculo do pico de pressão.

Além disso, quando convier tratar de picos inicial e secundário de pressão, o pico inicial, de intensidade  $p_{pico,1}^*$  é calculado como o que ocorre para um tempo adimensional inferior a 5. O pico secundário, de intensidade  $p_{pico,2}^*$ , é avaliado para tempos adimensionais superiores a 5. A intensidade  $p_{pico,max}^*$  é referente ao pico de pressão máximo, ou seja, o maior valor de pico de pressão para qualquer tempo adimensional de simulação. O pico de pressão máximo é sempre o que é utilizado como base de comparação para as reduções de pressão devido à introdução de aliviadores de pressão.

A Tabela 9 apresenta os tempos de estabilização e os picos de pressão para os casos de aliviador tipo êmbolo no ponto médio da tubulação e vazão fixa na entrada. As variáveis  $p_{pico}$  e  $t_{pico}$  são referentes à intensidade e o tempo de ocorrência do pico de pressão, ambos adimensionais. A variável  $\Delta p_{pico,max}^*$  representa a alteração da intensidade do pico de pressão, quando comparado ao caso-referência.

**Tabela 9 – Tempo de estabilização e picos de pressão para caso de aliviador tipo êmbolo e vazão fixa na entrada, com aliviador localizado em  $z^*=0,5$ .**

$Vol_t^*$	$t_{est}^*$	$\Delta t_{est}^* [\%]$	$p_{pico,1}^*$	$p_{pico,2}^*$	$t_{pico,max}^*$	$p_{pico,max}^*$	$\Delta p_{pico,max}^* [\%]$
Caso-referência	33,06	-	5,78	7,65	20,00	7,65	-
0,1%	34,04	+3,0	5,79	7,40	20,76	7,40	-3,3
0,5%	38,78	+17,3	5,79	6,39	23,72	6,39	-16,5
1,0%	46,08	+39,4	5,79	5,41	2,92	5,79	-24,3

Pode ser observado na Tabela 9 que o volume de 1% para o aliviador apresenta maiores diferenças em relação ao caso-referência. O tempo de

estabilização aumenta em 39,4%, o que causa um reinício de escoamento mais demorado. Ao passo que o pico inicial de pressão não apresenta grandes diferenças do caso-referência, o segundo pico de pressão apresenta redução de 29,3% (7,65 para 5,41) em intensidade. Vale notar que, analisando o pico máximo, a redução de intensidade foi inferior, de 24,3%. Os estudos são portanto redirecionados a avaliar o aumento do tempo de estabilização e otimizar a redução dos picos de pressão.

A Tabela 10 apresenta o resultado das simulações para os casos em que aliviadores com o mesmo volume adimensional total de 1% são posicionados em diferentes pontos da tubulação. Para o caso em que mais de um aliviador é empregado, o volume total de 1% é igualmente dividido entre cada aliviador.

**Tabela 10 – Tempo de estabilização e pico de pressão para aliviadores tipo êmbolo e vazão fixa na entrada, com volume adimensional total dos aliviadores de 1%.**

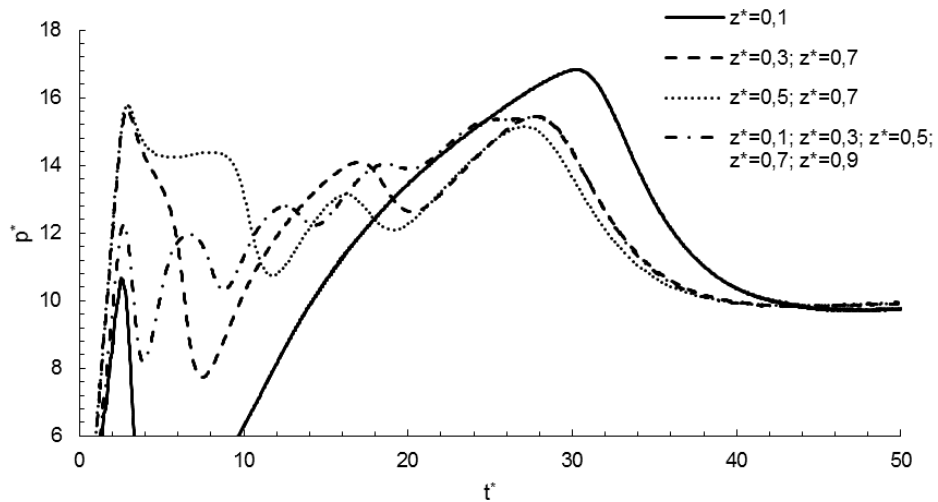
Quant. de aliviadores	$Z^*_{aliv}$	$t^*_{est}$	$\Delta t^*_{est}$	$p^*_{pico,1}$	$p^*_{pico,2}$	$t^*_{pico,max}$	$p^*_{pico,max}$	$\Delta p^*_{pico,max}$ [%]
Caso-referência	-	33,06	-	5,78	7,65	20,00	7,65	-
1	0,1	<b>47,7</b>	<b>+44,3</b>	<b>0,66</b>	6,84	30,38	6,84	-10,6
1	0,3	46,02	+39,2	5,61	6,20	28,96	6,20	-19,0
1	0,5	46,08	+39,4	5,79	5,41	2,92	5,79	-24,3
1	0,7	41,82	+26,5	5,83	5,61	2,92	5,83	-23,8
1	0,9	37,56	+13,6	5,80	6,97	17,54	6,97	-8,9
2	0,1 e 0,3	46,06	+39,3	1,04	6,49	29,62	6,49	-15,2
2	0,1 e 0,5	45,02	+36,2	1,04	6,10	28,96	6,10	-20,3
2	0,1 e 0,7	41,64	+26,0	1,04	5,72	28,34	5,72	-25,2
2	0,1 e 0,9	44,48	+34,5	1,04	6,54	22,80	6,54	-14,5
2	0,3 e 0,5	45,72	+38,3	5,62	5,82	28,34	5,82	-23,9
<b>2</b>	<b>0,3 e 0,7</b>	43,40	+31,3	5,62	5,45	2,88	<b>5,62</b>	<b>-26,5</b>
2	0,3 e 0,9	42,10	+27,3	5,62	6,03	22,10	6,03	-21,2
2	0,5 e 0,7	43,72	+32,2	5,79	<b>5,15</b>	2,92	5,79	-24,3
2	0,5 e 0,9	41,58	+25,8	5,79	5,49	2,92	5,79	-24,3
2	0,7 e 0,9	39,82	+20,4	5,82	5,64	2,92	5,82	-23,9
5	0,1, 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9	43,38	+31,2	2,25	5,45	27,82	<b>5,45</b>	<b>-28,8</b>



Pode-se observar na Tabela 10 que diferentes posicionamentos dos aliviadores trazem distintos ganhos para o escoamento. Quanto ao tempo de estabilização, se torna claro que quanto mais próximo da entrada do escoamento o aliviador é posicionado, maior é o seu aumento. O valor máximo para tanto é quando um único aliviador é posicionado em  $z^*=0,1$ , de 44,3% para o tempo de estabilização.

A intensidade do primeiro pico de pressão apresenta valores reduzidos para casos em que aliviadores – unitários ou em par – são posicionados próximos à entrada do escoamento, em  $z^*=0,1$ . Quanto à intensidade dos picos de pressão iniciais, há redução superior a 25% para casos em que aliviador(es) é(são) posicionado(s) em  $z^*=0,5$  ou em  $z^*=0,5$  e  $0,9$ , e em todos os casos em que aliviadores unitários ou em par são posicionados em  $z^*=0,7$ .

A Figura 19 apresenta as curvas de pressão na entrada do aliviador,  $z^*=0,0$ , para diferentes casos. O caso de aliviadores em  $z^*=0,3$  e  $z^*=0,7$  assume os menores picos de pressão dentre os casos estudados, com um pico de pressão 26,5% menor que o máximo valor registrado para o caso-referência. Os casos de  $z^*=0,1$ ; e  $z^*=0,5$  e  $z^*=0,7$  são também analisados por possuírem os menores picos iniciais e secundários de pressão, respectivamente. O caso de êmbolo em  $z^*=0,1$  também representa a situação de maior tempo de estabilização. Além disso, o caso de cinco aliviadores, posicionados a 10, 30, 50, 70 e 90% de distância da entrada é representado, sendo este o único caso de mais de dois êmbolos estudado. O eixo das abcissas inicia em  $p^*=6$  para permitir uma amplificação da região do gráfico referente aos picos de pressão.



**Figura 19. Evolução de pressão na entrada, para tubulação com vazão fixa na entrada, volume total  $Vol_t^* = 0,5\%$ , e aliviador(s) tipo êmbolo em  $z^* = 0,1$ ;  $z^* = 0,3$  e  $0,7$ ; e  $z^* = 0,5$  e  $0,7$ .**

Da Figura 19 observa-se que para cada perfil da pressão na entrada do tubo, repete-se o padrão observado na Figura 18. O padrão observado é de uma redução brusca na pressão na entrada da tubulação no momento em que cada aliviador passa a receber fluido. Esse momento é marcado pelo crescimento abrupto da pressão na posição assumida pelo aliviador. As reduções de pressão ocorrem entre o tempo adimensional 0 e 10 para o aliviador em  $z^* = 0,1$ , e tempo adimensional  $\sim 7$ ,  $\sim 13$  e  $\sim 18$  para aliviadores em  $z^* = 0,3$ ,  $0,5$  e  $0,7$ , respectivamente, para os casos de pares de êmbolos. Para a configuração com cinco êmbolos, o êmbolo inicial posicionado a 10% de distância de entrada, e não 30% de distância como os casos dos pares, garante reduções de pressão nos tempos adimensionais  $\sim 4$ ,  $\sim 8$ ,  $\sim 14$ ,  $\sim 21$  e  $\sim 21$  para aliviadores em  $z^* = 0,1$ ,  $0,3$ ,  $0,5$ ,  $0,7$  e  $0,9$ , respectivamente.

Pode-se observar da Figura 19 o comportamento da pressão na entrada do tubo, para o caso de um aliviador único em  $z^* = 0,1$ , que apresenta o maior tempo de estabilização e o menor pico de pressão inicial. O perfil de pressão, porém, é prejudicado por uma redução seguida de crescimento brusco da variável após o pico inicial de pressão, até um pico secundário de maior intensidade que os outros casos estudados. Os dois outros casos de êmbolos em par, porém, apresentam comportamento similar entre si, com não somente dois e sim três picos de pressão,

nos tempos adimensionais  $\sim 3$ ,  $\sim 18$  e  $\sim 27$ , causados pela redução de pressão ocasionada por cada aliviador empregado, como discutido no parágrafo anterior.

O caso de aliviadores em  $z^*=0,5$  e  $z^*=0,7$  apresenta um melhor desempenho por possuir um perfil de pressão com o tempo mais homogêneo, apesar de apresentar um pico de pressão levemente mais acentuado que o caso com aliviadores em  $z^*=0,3$  e  $z^*=0,7$ . Além de possuir o caso mais homogêneo, para a configuração de aliviadores em  $z^*=0,5$  e  $z^*=0,7$  o maior pico de pressão, de  $p^*=5,79$ , é 24% menor de que o maior pico registrado para o caso-referência. Vale notar que o perfil de pressão para o caso do emprego de cinco êmbolos também é homogêneo e apresenta redução do pico de pressão máximo de 28,8%. Porém, seu uso não é justificado dado o desempenho homogêneo da configuração de dois aliviadores em  $z^*=0,5$  e  $z^*=0,7$ .

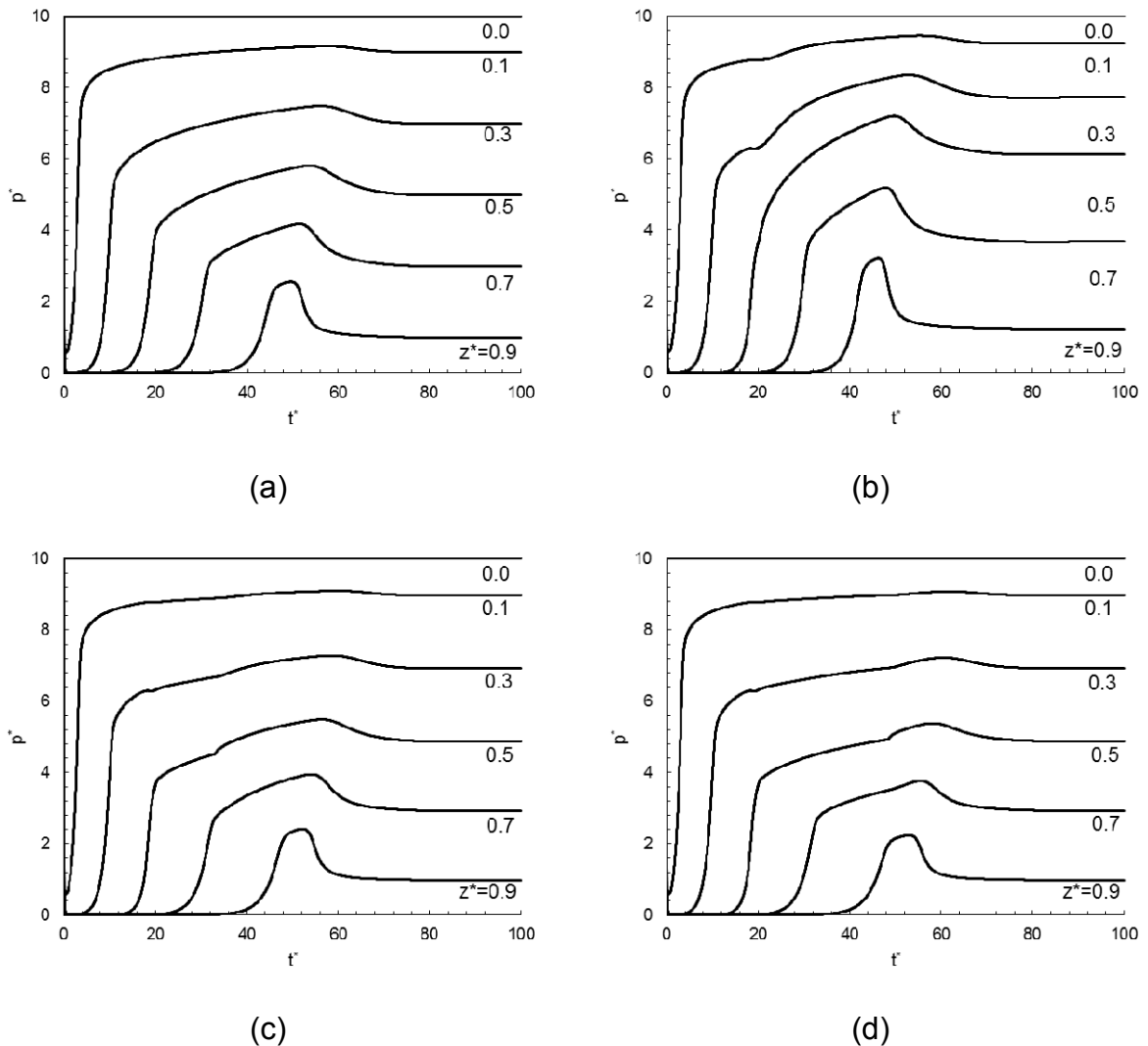
## **5.4 Avaliação da Introdução de Aliviadores tipo Resistivo à Tubulação**

### **5.4.1 Aliviadores tipo Resistivo, Pressão Fixa na Entrada da Tubulação**

A mesma metodologia empregada para a análise da introdução de aliviadores tipo êmbolo é empregada para estudar o segundo tipo de aliviadores. Para tanto, os estudos iniciais dos aliviadores tipo resistivo consistem na avaliação dos campos de pressão para aliviadores com volumes  $Vol_t^*=0,1\%$ ,  $0,5\%$  e  $1\%$ , para um aliviador resistivo localizado no ponto médio da tubulação e condição de entrada de pressão constante, tal qual apresentado na Figura 20.

Vale mencionar que, como listado na Seção 3.6, o comportamento do aliviador resistivo depende não somente de seu volume, depende também da resistência hidráulica. Para tanto, uma resistência hidráulica adimensional  $K_r^*=4,46.10^7$  será empregada. Tal resistência proporciona uma velocidade de fuga igual a 50% da intensidade da velocidade axial de regime permanente da simulação, para a pressão de regime permanente no ponto médio da tubulação. Ou seja, para o valor eleito de resistência hidráulica, dado uma situação em que o reinício de escoamento alcance pressões de regime permanente, o aliviador posicionado no ponto médio deve receber metade do fluido escoando caso ainda não esteja cheio.

Para aplicações práticas, uma válvula teria de ser projetada de forma a garantir a resistência hidráulica fixa. Vale notar que a mesma resistência hidráulica é utilizada caso a válvula seja posicionada em pontos distintos do ponto médio da tubulação. Pode-se prever, portanto, que as válvulas que no decorrer do trabalho forem posicionadas mais próximas da entrada do tubo venham a encher mais rapidamente, dado as maiores pressões da região, e vice-versa.



**Figura 20. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo resistivo em  $z^*=0,5$ , pressão fixa na entrada e  $Kr^*=4,46 \cdot 10^7$ . (a) Caso-referência, (b)  $Vol_t^*=0,1\%$ , (c)  $Vol_t^*=0,5\%$ , (d)  $Vol_t^*=1,0\%$ .**

Pode-se observar na Figura 20 que, similar ao verificado para aliviadores tipo êmbolo, os campos de pressão se tornam mais distintos do caso-referência à medida que o volume do aliviador é aumentado. O momento em que as curvas de

pressão são alteradas também é similar, ocorrendo em  $t^* \sim 20$ , quando a pressão no ponto médio da tubulação cresce partindo de zero.

Pode-se lembrar que, para o caso de aliviadores tipo êmbolo, a introdução do aliviador causava uma queda acentuada de pressão para as curvas de coordenadas axiais menores ou iguais ao ponto médio, no momento quando a pressão no ponto onde o aliviador estava localizado crescia partindo de zero. Para o aliviador resistivo, porém, o que ocorre é um crescimento da pressão menos acentuado após o momento quando comparado ao caso-referência. Esse crescimento é facilmente visualizável para as curvas de pressão relativas a  $z^*=0,7$ , e é consideravelmente linear. O comportamento aproximadamente linear se estende por maiores tempos quando maior é o aliviador, estendendo-se de  $t^* \sim 20$  a  $t^* \sim 48$  para um volume de aliviador de 1%. A Tabela 11 apresenta os tempos de estabilização para os casos de aliviador tipo resistivo. Exibe também os tempos de enchimento dos aliviadores resistivos,  $t_{ench}^*$ , que denotam o fim da fuga de fluido da tubulação ao aliviador.

**Tabela 11 – Tempo de enchimento e estabilização para caso de aliviador tipo resistivo e pressão fixa na entrada, com aliviador localizado em  $z^*=0,5$ .**

$Vol_t^* [\%]$	$t_{ench}^*$	$t_{est}^*$	$\Delta t_{est}^* [\%]$
Caso-referência	-	75,88	-
0,1	20,22	73,42	-3,2
0,5	33,22	76,64	+1,0
1,0	48,56	77,52	+2,2

Pode-se observar da Tabela 11 que, diferentemente dos casos de êmbolo, a introdução de aliviadores resistivos pode trazer tanto aumentos quanto reduções ao tempo de estabilização do escoamento. O tempo de estabilização tende a aumentar à medida que o volume aumenta, porém para o pequeno volume de  $Vol_t^*=0,1\%$  o tempo de estabilização é efetivamente menor que o do caso-referência.

Pode-se observar que o tempo de enchimento pequeno de  $t^*=20,22$  para o menor dos aliviadores poderia vir a explicar o fato do tempo de estabilização reduzir-se para tal caso. O aliviador de pressão atua em um tempo curto, desde  $\sim 15$ , quando o crescimento de pressão em  $z^*=0,5$  começa, até o enchimento em 20,22. Pelo tempo de atuação curto, ao invés de atrasar a estabilização do escoamento

como o recorrentemente observado, o aliviador de pressão agiliza o reinício, aliviando a pressão sem fazer com que o reinício de escoamento ocorra em uma série de etapas.

Pode-se também ser observado que o tempo de enchimento coincide com o final do comportamento linear das curvas de pressão na coordenada média do escoamento, descrito dois parágrafos acima. Esse fato ocorre pelo comportamento linear ser substituído pelo comportamento não-linear comum ao escoamento à medida que o aliviador enche completamente e cessa o recebimento de fluido.

A Tabela 12 apresenta o resultado das simulações para os casos em que aliviadores resistivos com o mesmo volume adimensional total de 1% são posicionados em diferentes pontos da tubulação. Para o caso em que mais de um aliviador é empregado, o volume total de 1% é igualmente dividido entre cada aliviador. É importante notar que para todos os casos em que há dois aliviadores, o aliviador localizado mais próximo da entrada é o primeiro a encher, e portanto possui o menor dos dois  $t_{ench}^*$  apresentados.

**Tabela 12 – Tempo de enchimento e estabilização para aliviadores tipo resistivo e pressão fixa na entrada, com volume adimensional total dos aliviadores de 1%.**

Quantidade de aliviadores	$Z^*_{aliv}$	$t^*_{ench}$	$t^*_{est}$	$\Delta t^*_{est}$ [%]
Caso-referência	-	-	75,88	-
1	0,1	25,00	75,78	-0,1
1	0,3	35,46	75,88	0,0
1	0,5	48,56	77,52	+2,2
1	0,7	65,28	70,88	-6,6
1	0,9	103,28	76,46	+0,8
2	0,1 e 0,3	13,64; 22,46	75,30	-0,8
2	0,1 e 0,5	13,60; 33,64	76,36	+0,6
2	0,1 e 0,7	13,60; 47,46	78,88	+4,0
2	0,1 e 0,9	13,60; 69,4	75,00	-1,2
2	0,3 e 0,5	22,28; 34,18	75,60	-0,4
2	0,3 e 0,7	22,22; 48,3	78,32	+3,2
2	0,3 e 0,9	22,22; 70,6	73,54	-3,1
<b>2</b>	<b>0,5 e 0,7</b>	<b>33,3; 48,82</b>	<b>79,20</b>	<b>+4,4</b>
2	0,5 e 0,9	33,24; 71,34	74,14	-2,3
2	0,7 e 0,9	46,9; 71,22	79,10	+4,2

Pode-se observar da Tabela 12 que o tempo de estabilização não apresenta uma correlação direta com o posicionamento dos aliviadores. Para o caso de um único aliviador, o tempo de estabilização se mantém relativamente constante para todos os casos, com exceção de um aumento para o posicionamento no ponto médio e uma queda para posicionamento em  $z^*=0,7$ .

Para os casos em que mais de um aliviador é empregado, pode-se observar que o tempo de estabilização é superior ao do caso-referência quando um dos dois aliviadores é posicionado em  $z^*=0,7$ . Pode-se concluir que para aliviadores tipo resistivo e o escoamento estudado com condição de pressão fixa na entrada, a análise não traz resultados conclusivos quanto à otimização por posicionamento dos aliviadores, para o aumento ou a redução dos tempos de estabilização do reinício de escoamento. Ou seja, não é clara a relação entre o posicionamento dos aliviadores

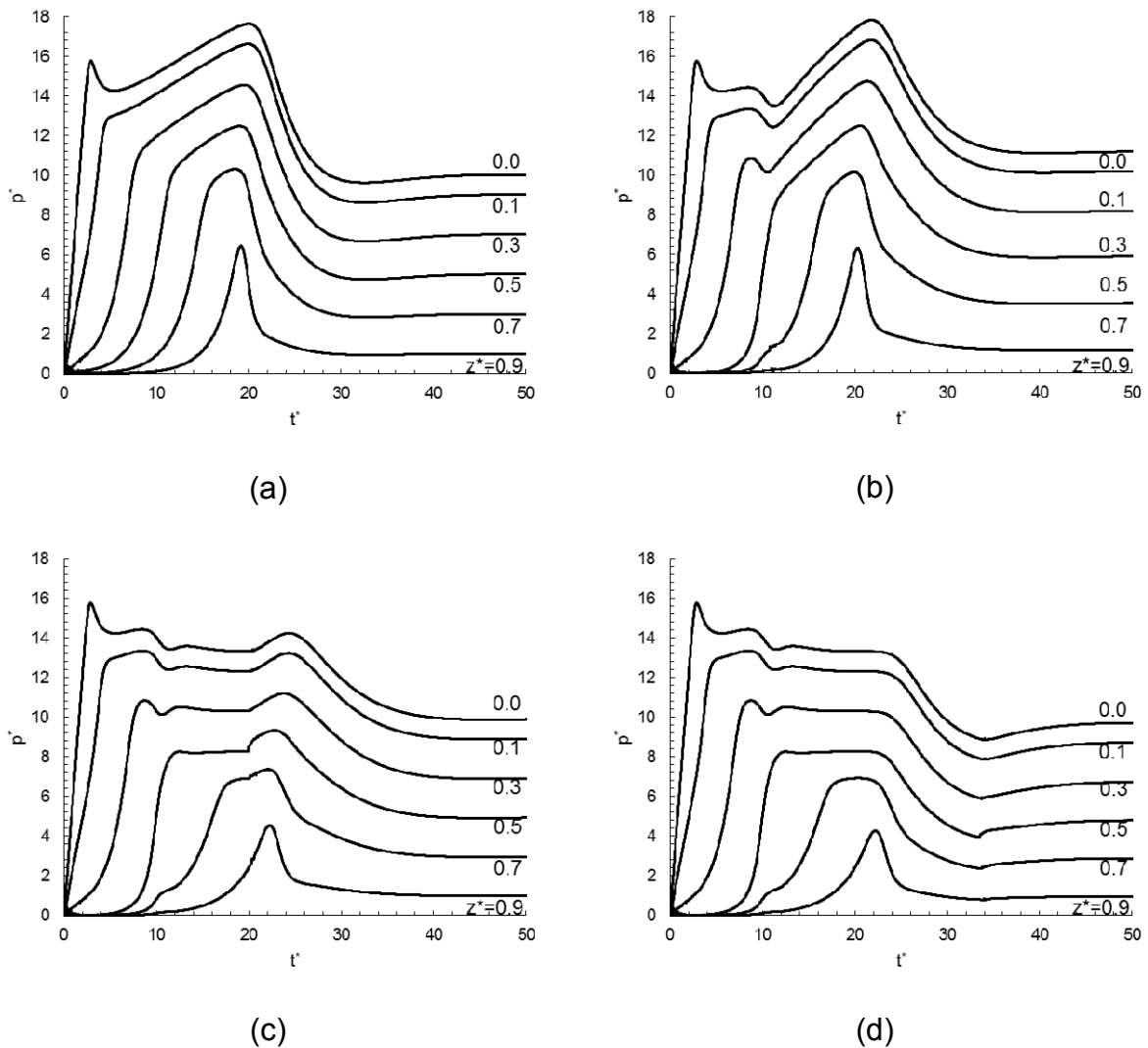
e o ganho em atraso do escoamento. Observa-se, unicamente, um valor máximo de aumento do tempo de estabilização, 4,4% maior que o caso-referência, para um par de aliviadores em  $z^*=0,5$  e  $z^*=0,7$ . Além disso, vale mencionar que para um único aliviador posicionado em  $z^*=0,9$ , a pressão nesta posição e conseqüentemente a fuga de fluido ao aliviador são tão baixas que a estabilização ocorre antes do enchimento completo do aliviador.

#### **5.4.2 Aliviadores tipo Resistivo, Vazão Fixa na Entrada da Tubulação**

Para a condição de contorno na entrada de vazão fixa, há a ocorrência de picos de pressão que superam a pressão de regime permanente para a coordenada axial zero do escoamento, como observado na Seção 5.1 e previamente discutido. Por esse motivo, novamente a análise da introdução de aliviadores focará na influência dos aliviadores no tempo necessário à estabilização da pressão no reinício do escoamento, e na redução dos picos de pressão.

Seguindo a metodologia estabelecida, os testes iniciais consistem em avaliar três casos, com três diferentes volumes  $Vol_t^*=0,1\%$ ,  $0,5\%$  e  $1\%$ , para um aliviador resistivo localizado no ponto médio da tubulação,  $z^*=0,5$ . A Figura 21 apresenta os campos de pressão para essas simulações.





**Figura 21. Evolução de pressão, para tubulação com aliviador tipo resistivo em  $z^*=0,5$ , vazão fixa na entrada e  $Kr^*=4,46 \cdot 10^7$ . (a) Caso-referência, (b)  $Vol_t^*=0,1\%$ , (c)  $Vol_t^*=0,5\%$ , (d)  $Vol_t^*=1,0\%$ .**

Pode-se observar da Figura 21 que, novamente, à medida que o volume do aliviador aumenta o comportamento da pressão com o tempo se torna mais distante do caso-referência apresentado na Figura 21-a. A inserção do aliviador tipo resistivo em  $z^*=0,5$  afeta a evolução da pressão com uma queda entre ambos os picos, no tempo adimensional  $\sim 10$ , quando há um crescimento considerável da pressão no ponto  $z^*=0,5$ . Tal redução de pressão se torna mais significativa com o aumento do volume do aliviador.

A diferença para o aliviador resistivo é que a queda de pressão, mencionada no parágrafo anterior, acaba por causar um comportamento aproximadamente linear

das pressões na tubulação à medida que o volume do aliviador aumenta. Tanto é a influência nas curvas de pressão ocasionados pela introdução do aliviador resistivo, que para volumes de 0,5 e 1% de aliviador a pressão após o tempo adimensional  $\sim 10$  mantém-se em decréscimo contínuo, eliminando o pico secundário de pressão do caso-referência.

A Tabela 13 apresenta os tempos de estabilização e os picos de pressão para os casos de aliviador tipo resistivo no ponto médio da tubulação e vazão fixa na entrada. Por decorrência da eliminação do pico secundário de pressão com a introdução do aliviador resistivo, discutida no parágrafo anterior, a avaliação de picos inicial e secundário de pressão não é mais realizada. Portanto, somente o máximo pico de pressão da simulação é registrado.

**Tabela 13 – Tempo de enchimento e estabilização, e pico de pressão para caso de aliviador tipo resistivo e vazão fixa na entrada, com aliviador localizado em  $z^*=0,5$ .**

$Vol_t^*$	$t_{ench}^*$	$t_{est}^*$	$\Delta t_{est}^*$ [%]	$t_{pico,max}^*$	$p_{pico,max}^*$	$\Delta p_{pico,max}^*$ [%]
Caso-referência	-	33,06	-	20,00	7,65	-
0,1%	10,58	39,72	+20,1	21,82	7,85	+2,6
0,5%	19,94	44,38	+34,2	2,90	5,78	-24,4
1,0%	33,52	48,9	+47,9	2,90	5,78	-24,4

Pode ser observado a partir da Tabela 13 que o volume de 1% para o aliviador apresenta maiores diferenças em relação ao caso-referência. O tempo de estabilização aumenta em 47,9%, e o pico de pressão se reduz em 24,4%. A redução do pico de pressão apresenta o mesmo valor para o caso de um volume de 0,5%, pois, como pode ser observado na coluna de  $t_{pico,max}^*$ , o que ocorre é que o pico máximo está ocorrendo na etapa inicial do escoamento. Ou seja, para volumes de aliviadores de pressão de 0,5 e 1,0% o pico secundário está sendo eliminado.

O aliviador de menor volume, 0,1% apresenta um resultado distinto dos demais. Por mais que tal aliviador reduzido apresente um tempo de estabilização maior que o caso-referência, observável no atraso da Figura 21-b comparada a Figura 21-a, o pico de pressão para tal caso apresenta um valor levemente superior

ao pico de pressão do caso-referência. Novamente presume-se que tal fenômeno é decorrente da natureza aleatória da atuação de aliviadores de pressão na tubulação em um tempo muito curto de enchimento.

A Tabela 14 apresenta o resultado das simulações para os casos em que aliviadores com o mesmo volume adimensional total de 1% são posicionados em diferentes pontos da tubulação. Para o caso em que mais de um aliviador é empregado, o volume total de 1% é igualmente dividido entre cada aliviador. Novamente, ressaltar-se que para todos os casos em que há mais de um aliviador resistivo, os aliviadores enchem na ordem em que foram instalados, a partir da entrada na direção do escoamento.

**Tabela 14 – Tempo de enchimento e estabilização, e pico de pressão para aliviadores de pressão tipo resistivo e vazão fixa na entrada, com volume adimensional total dos aliviadores de 1%.**

Quant. de aliviadores	$Z_{aliv}^*$	$t_{ench}^*$	$t_{est}^*$	$\Delta t_{est}^*$ [%]	$t_{pico,max}^*$	$p_{pico,max}^*$	$\Delta p_{pico,max}^*$ [%]
Caso-referência	-	-	33,06	-	20,00	7,65	-
1	0,1	24,56	47,02	+42,2	30,90	<b>3,94</b>	<b>-48,5</b>
1	0,3	27,66	48,92	+48,0	2,90	5,65	-26,1
1	0,5	33,52	48,90	+47,9	2,90	5,78	-24,4
1	0,7	45,26	<b>56,60</b>	+71,2	2,90	5,78	-24,4
1	0,9	76,82	45,46	+37,5	18,08	7,07	-7,6
2	0,1 e 0,3	14,56; 21,62	56,40	+70,6	35,26	4,60	-39,9
<b>2</b>	<b>0,1 e 0,5</b>	13,38; 26,00	56,32	+70,4	2,74	<b>3,34</b>	<b>-56,3</b>
2	0,1 e 0,7	13,3; 30,88	56,14	+69,8	28,04	3,78	-50,6
2	0,1 e 0,9	13,32; 47,62	42,68	+29,1	25,48	5,34	-30,2
2	0,3 e 0,5	17,12; 24,60	60,84	+84,0	2,90	5,65	-26,1
2	0,3 e 0,7	16,34; 29,84	59,96	+81,4	2,88	5,65	-26,1
2	0,3 e 0,9	16,28; 46,02	45,24	+36,8	2,90	5,65	-26,1
2	0,5 e 0,7	20,60; 28,28	61,92	+87,3	2,90	5,78	-24,4
2	0,5 e 0,9	19,98; 44,48	56,52	+71,0	2,90	5,78	-24,4
2	0,7 e 0,9	24,88; 47,44	<b>67,68</b>	+104,7	2,90	5,78	-24,4
5	0,1, 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9	6,40; 11,66; 18,30; 25,46; 33,42	<b>85,12</b>	+157,5	35,28	3,53	-53,9

Pode-se observar da Tabela 14 que, de forma similar ao caso de êmbolos, diferentes posicionamentos dos aliviadores de pressão resistivos trazem distintas consequências ao escoamento. Quanto ao tempo de estabilização, se pode observar que dentre os casos de somente um aliviador, há um máximo para quando

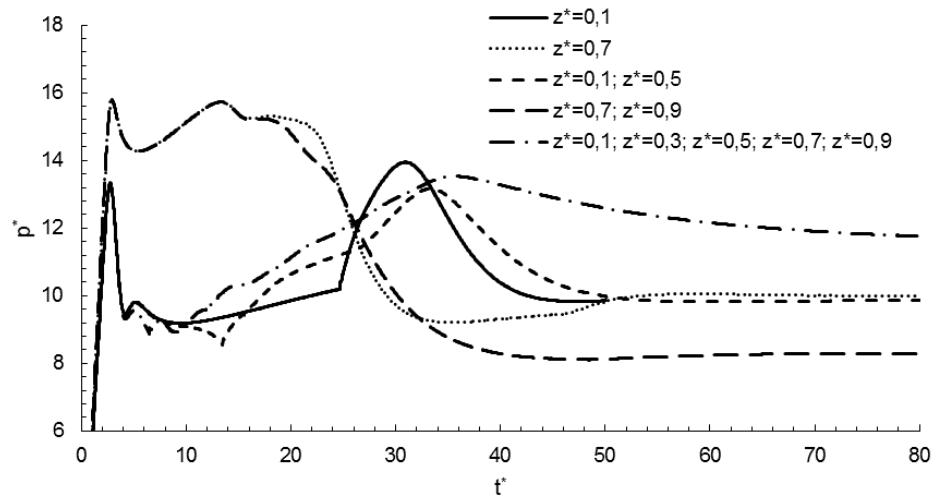
o aliviador é posicionado em  $z^*=0,7$ , sendo 71,2% maior que o tempo obtido para o caso-referência.

Quando há um par de aliviadores, vários casos apresentam mais de 50% de aumento no tempo de estabilização, sendo a configuração de aliviadores em  $z^*=0,7$  e  $0,9$  a que apresenta o maior tempo de estabilização, 104,7% maior de que o obtido para o caso-referência. Novamente se observa, também, que para os casos de aliviadores em  $z^*=0,9$ ;  $z^*=0,1$  e  $z^*=0,9$ ;  $z^*=0,3$  e  $z^*=0,9$ ; a estabilização ocorre antes de que o aliviador em  $z^*=0,9$  é completado. Para o caso do emprego de cinco aliviadores, o tempo de estabilização sofre um aumento de 157,5%, por decorrência do reinício do escoamento ocorrer em uma série de etapas.

Quanto ao pico de pressão, pode-se observar um padrão de otimização. Para o caso de somente um aliviador empregado, quanto mais próximo o aliviador for posicionado da entrada da tubulação, melhor será a redução do pico de pressão. Esse comportamento era esperado observando-se a Figura 21-d, pois, visto que o pico secundário de pressão é eliminado com o uso de um aliviador no ponto médio com 1,0% de volume, o pico inicial torna-se de maior importância. Portanto se espera que quanto mais próximo o aliviador for posicionado da entrada, maiores sejam as reduções de pico de pressão. Para o caso de um aliviador posicionado a 10% de distância da entrada, apresentou-se uma redução de 48,5% no pico de pressão.

Quanto ao uso de mais de um aliviador, pelos motivos discutidos no parágrafo acima, pode-se esperar que casos em que não há aliviadores em  $z^*=0,1$  não venham a apresentar grandes reduções no pico de pressão por não lidarem com o pico inicial. Portanto observa-se que todas as configurações que não utilizam de aliviadores em  $z^*=0,1$  apresentam redução máxima no pico de pressão de 26,1%.

Dentre os casos que empregam aliviadores em  $z^*=0,1$  se destaca a configuração de aliviadores resistivos em  $z^*=0,1$  e  $z^*=0,5$ . Tal configuração permite a maior redução do pico de pressão estudada, de 56,3%. Nota-se também que o caso de cinco aliviadores espalhados na tubulação não apresenta tamanha redução de pressão. Para melhor compreender o perfil de pressões obtidos para alguns casos, as curvas de pressão na entrada,  $z^*=0,0$ , são apresentadas na Figura 22.



**Figura 22. Evolução de pressão na entrada, para tubulação com vazão fixa na entrada, volume total  $Vol_t^* = 0,5\%$ , e aliviador(s) tipo resistivo em  $z^* = 0,1$ ;  $z^* = 0,7$ ;  $z^* = 0,1$  e  $0,5$ ; e  $z^* = 0,7$  e  $0,9$ .**

A Figura 22 apresenta os casos que utilizam de um ou mais aliviadores para o maior acréscimo do tempo de estabilização,  $z^* = 0,7$ ; e  $z^* = 0,7$  e  $0,9$ ; e a maior redução dos picos de pressão,  $z^* = 0,1$ ; e  $z^* = 0,1$  e  $0,5$ . Além disso, o caso de cinco aliviadores posicionados em 10, 30, 50, 70 e 90% de distância da entrada também é apresentado.

Uma análise inicial pode ser feita para as curvas que apresentam maior tempo de estabilização com o uso de até dois aliviadores. No início da simulação o aliviador em  $z^* = 0,9$  influencia pouco o escoamento pela baixa pressão atuante, e o aliviador em  $0,7$  atua da mesma maneira para ambos os casos. Esta é a razão pela qual ambas as curvas de pressão coincidem até  $t^* \sim 18$ . Após tal instante a pressão atuante em  $0,9$  torna-se significativa, e a fuga de fluido para o aliviador lá localizado começa a afetar o campo de pressão.

O efeito decorrente do tempo de atuação de cada aliviador de pressão é que a pressão continua a decrescer continuamente até o enchimento do segundo aliviador em  $t^* = 47,44$ . A partir desse momento então a pressão na entrada passa a caminhar para o equilíbrio a partir de um valor consideravelmente abaixo do valor de regime permanente. Portanto, pode-se compreender a razão pela qual a configuração de aliviadores em  $z^* = 0,7$  e  $0,9$  resulta no maior tempo até a estabilização quando até dois aliviadores são empregados.

Quanto aos casos plotados para abordar as maiores reduções nos picos de pressão, também há uma coincidência das curvas até  $t^* \sim 10$ . Novamente o comportamento é explicado pelo aliviador mais distante possuir menores pressões, e portanto tardar a influenciar o escoamento. Para o caso de um único aliviador resistivo em  $z^*=0,1$ , o tempo adimensional de enchimento, de 24,56, marca claramente no gráfico a transição entre o comportamento consideravelmente linear da pressão e o crescimento não linear até o valor de pico.

Para o caso de um par de aliviadores em  $z^*=0,1$  e  $0,5$ , ambos os tempos de enchimento de aliviador, 13,38 e 26,00, apresentam novamente alterações visíveis do escoamento. Nota-se, porém, que a introdução do aliviador no ponto médio da tubulação permite um tempo de enchimento superior. Portanto, após o enchimento, a pressão cresce até o menor valor de pico registrado para as simulações de casos de vazão constante na entrada. Dado o perfil de pressões de poucas oscilações e menor pico, a condição de par de aliviadores em  $z^*=0,1$  e  $0,5$  é eleita como a de melhor desempenho em termos de picos de pressão.

É importante também discorrer sobre a curva representativa do uso de 5 aliviadores de pressão na tubulação. Tal curva, diferentemente das outras discutidas, apresenta um desenvolvimento mais suave da pressão durante o reinício do escoamento. Isso é decorrente do emprego de muitos aliviadores, o que faz com que o fim de enchimento de um aliviador não interfira significativamente no comportamento da pressão para aquele instante de tempo. Porém, como pode-se deduzir dos resultados do parágrafo anterior, o uso de 5 aliviadores de pressão não apresentou o caso com maior redução de pico de pressão dentre os casos estudados.

Vale comentar também sobre as pressões de estabilização. Para  $t^*=80$  todas os casos estudados estão caminhando para a condição de regime permanente. Porém, alguns casos, especificamente o dos 5 aliviadores de pressão e o de um par de aliviadores a 70 e 90% de distância da entrada, apresentam pressões muito distantes da pressão de regime permanente. Isso ocorre pelos aliviadores distantes da entrada da tubulação (em  $z^*=0,70$  e  $0,90$ ) demorarem muito tempo a encher. Por mais que a tubulação entre em equilíbrio, ainda existe uma evolução temporal de

crescimento ou redução da pressão, necessária para que o escoamento atinja o regime permanente.

## 5.5 Consolidação dos Resultados

Para o caso de pressão fixa na entrada do tubo, os esforços foram direcionados a avaliar a influência no tempo de reinício de escoamento. Em geral um atraso foi observado, por decorrência do reinício do escoamento ocorrer em etapas. O atraso é maléfico para o reinício, porém sua avaliação é importante, pois ele representa o preço a ser pago pela introdução de aliviadores de pressão à tubulação.

Os maiores aumentos para o tempo de estabilização do sistema foram obtidos para aliviadores de maior volume, independentemente de serem tipo êmbolo ou resistivo. Para tanto, foram utilizadas simulações com aliviadores localizados no ponto médio da tubulação e providos de volumes iguais a 0,1, 0,5 e 1,0% do volume da tubulação. O acréscimo no tempo para a estabilização foi de 4,0% para o aliviador tipo êmbolo e 2,2% para o aliviador resistivo.

Após um estudo iterativo de posicionamento de um ou dois aliviadores com o mesmo volume total de 1%, em diferentes posições da tubulação, obteve-se então um aumento máximo do tempo de estabilização de 5,1% para o caso de êmbolo e 4,4% para o caso resistivo. Esse aumento foi obtido para aliviadores localizados a 50% e 70% de distância da entrada, em ambos os casos.

Apesar das posições geométricas de máximo aumento para o tempo de estabilização serem coincidentes para os diferentes tipos de aliviadores, os diferentes tipos apresentaram distintos padrões para a influência da posição dos aliviadores em relação ao tempo de estabilização. Para aliviadores tipo êmbolo, observou-se um padrão de que a posição de 70% de distância da entrada apresentava um ponto máximo para o tempo de estabilização, tanto para casos de aliviadores unitários ou em pares. Já para o caso resistivo, não pôde-se evidenciar um padrão para a influência do posicionamento dos aliviadores no tempo de estabilização, que inclusive apresentaram alguns casos de redução em comparação ao caso-referência. Presume-se que este resultado de redução e não aumento do



tempo de estabilização ocorra pela influência incerta para o reinício de escoamento quando os aliviadores de pressão resistivos encham em tempos muito curtos.

Para a condição de contorno de vazão fixa na entrada, além de ser avaliado o aumento do tempo de estabilização, picos de pressão puderam ser reduzidos para garantir um reinício de escoamento menos agressivo à tubulação. A análise dos picos de pressão pôde ser feita separando-os entre picos evidenciados em um momento inicial do reinício de escoamento, em um regime predominantemente elástico, e um segundo pico em um momento secundário. A análise dos picos de pressão inicial e secundário é útil para aliviadores tipo êmbolo, que apresentam dois picos de pressão evidentes, tal qual o caso-referência. Porém, houveram casos em que o segundo pico de pressão foi eliminado pela introdução do aliviador resistivo. Portanto, para este tipo de aliviador unicamente análise do pico de pressão máximo foi realizada.

Para aliviadores localizados no ponto médio da tubulação, novamente um estudo de volumes de aliviadores de 0,1, 0,5 e 1,0% foi realizado, constatando novamente um acréscimo contínuo da influência dos aliviadores com o aumento de seu volume. Para volumes de 1% o aliviador tipo êmbolo proporcionou aumento de 39,4% para o tempo de estabilização e redução de 24,3% para a intensidade do pico de pressão. Para o aliviador resistivo nas mesmas condições um aumento do tempo de estabilização de 47,9% foi registrado, e uma redução do pico de pressão de 24,4%.

Um estudo iterativo de posicionamento de um ou dois aliviadores com o volume total de 1%, em diferentes posições da tubulação, foi então realizado. Obteve-se um aumento do tempo de estabilização máximo de 44,3% para o caso de êmbolo (único êmbolo a 10% de distância da entrada) e 104,7% para o caso resistivo (aliviadores a 70 e 90% de distância da entrada). Pode-se concluir que, diferente da condição de entrada de pressão fixa, para a vazão fixa as posições de maior aumento para o tempo de estabilização variam com o tipo de aliviador. Enquanto um êmbolo localizado no início da tubulação é a configuração que atrasa o reinício, aliviadores resistivos possuem tal valor máximo de tempo de estabilização ao serem posicionados próximos do fim do tubo. Além disso, o aumento do tempo de

estabilização máximo proporcionado pelo aliviador resistivo é mais de duas vezes o aumento proporcionado pelo êmbolo.

Quanto a picos avaliados na pressão de entrada da tubulação, a mesma metodologia de otimização geométrica foi realizada. Foram obtidas reduções nos picos de pressão de 26,5% para o caso de êmbolo (par localizado a 30 e 70% de distância da entrada) e 56,3% para o caso resistivo (par localizado a 10 e 50% de distância da entrada). Porém, analisando as curvas de pressão de êmbolos com melhores resultados, pôde-se concluir que para o aliviador tipo êmbolo, a configuração com o perfil de pressões mais homogêneo é a de um par localizado a 50 e 70% de distância da entrada. Para esse caso a redução do pico de pressão é de 24,3%. Estudos com 5 aliviadores de pressão posicionados equidistantes apresentou uma redução de pressão superior para o caso de êmbolo, de 28,8%. Porém, tanto para o êmbolo quanto para o aliviador resistivo, foi assumido que não houve ganho significativo em redução de pressão que justifique o emprego de cinco aliviadores ao invés de dois.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões

Foi observado que não há alteração significativa para os resultados da simulação de reinício de escoamento ao considerar a variação temporal do módulo de elasticidade do fluido. Já quanto ao uso de diferentes aliviadores, diversas conclusões quantitativas foram levantadas e resumidas na Seção 5.5. Porém, como discutido na Seção 5.1, todos os resultados quantitativos obtidos valem unicamente para a condição de escoamento eleita. Presume-se, porém, que as seguintes conclusões qualitativas ocorrerão para diferentes condições geométricas e diferentes propriedades assumidas para o fluido:

- A consideração da alteração temporal do módulo elástico do fluido não deve causar alterações significativas dos resultados.
- A influência de um aliviador posicionado no ponto médio da tubulação deve aumentar com o acréscimo de seu volume.
- Êmbolos atuam no momento em que a pressão cresce partindo de zero na posição em que foram instalados, reduzindo as pressões nas posições axiais anteriores.
- Aliviadores resistivos, tais quais modelados no corrente trabalho, atuam por suavizar o comportamento das pressões nas coordenadas anteriores à sua posição, tornando-o próximo de um regime linear, e ocasionalmente eliminando picos de pressão, até seu enchimento.
- Para pressão fixa na entrada, os tempos de estabilização aumentam quando aliviadores são empregados. Deve-se observar um padrão claro para a influência da posição de êmbolos no atraso do reinício do escoamento, o que não ocorre para aliviadores resistivos.
- Para vazão fixa na entrada, os tempos de estabilização devem apresentar seus valores máximos para êmbolos posicionados próximos à entrada, ou aliviadores resistivos próximos às saídas.

- Novamente para o caso de vazão fixa, os picos de pressão devem ser minimizados para aliviadores de pressão afastados dos extremos inicial e final do tubo.
- Tanto para a influência no tempo de estabilização quanto para a redução nos picos de pressão, e para ambos tipos de aliviador, empregar dois aliviadores providos do mesmo volume total deverá trazer melhores resultados do que o caso de um só aliviador.
- Não se garante, porém, que o uso de cinco aliviadores possa justificar-se, dado ganhos similares em redução de picos de pressão quando comparados a casos de pares de aliviadores.
- Para a condição de pressão fixa na entrada, aliviadores tipo êmbolo ou resistivo apresentam a mesma ordem de grandeza para o aumento do tempo de estabilização.
- Para a condição de vazão fixa na entrada, aliviadores do tipo resistivo tendem a apresentar maiores reduções dos picos de pressão, com a consequência de também apresentarem maiores atrasos ao reinício de escoamento, quando comparados ao uso de êmbolos.

## **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Inicialmente, sugere-se que para futuros trabalhos, valores relativos às condições geométricas e parâmetros estruturais do fluido mais próximos da realidade sejam obtidos, e aplicados à ferramenta computacional desenvolvida. Tal oportunidade foi percorrida na Seção 5.1, pois para o corrente trabalho não foi possível a obtenção de parâmetros tixotrópicos mensurados para o óleo parafínico. Casos-referências mais próximos da realidade poderiam fornecer resultados quantitativos para a influência da introdução de aliviadores na tubulação.

Outra oportunidade seria o uso de testes laboratoriais. Caso uma bancada fosse capaz de gerar resultados para reinício de escoamento com e sem aliviadores, a ferramenta computacional poderia, com uso das propriedades do material e os parâmetros geométricos da bancada, prever a geometria ideal para a introdução de aliviadores. Da mesma forma, a bancada poderia ser utilizada para validar a ferramenta computacional.

Como previamente introduzido na Seção 3.3.2, pode-se sugerir para futuras linhas de pesquisa a modelagem do petróleo parafínico como detedor de tensão limite de escoamento real. Por mais que o modelo disponível na literatura permitisse uma análise usando de tensão limite de escoamento real e aparente, a abordagem utilizada foi somente a da tensão aparente. Portanto, mesmo que uma pressão ou vazão muito baixa viesse a ser aplicada na entrada do tubo, escoamento seria observado. Isso impede a ferramenta computacional de poder avaliar a influência da introdução de aliviadores, na pressão ou vazão necessária na na entrada da tubulação de forma a reiniciar o escoamento.

Além disso, a implementação de um método para o cálculo iterativo dos volumes de controle com aliviadores de pressão, que não o Método da Secante, é recomendada. Tal sugestão é feita pelo fato da convergência do Método da Secante ser diretamente dependente da estimativa inicial para a variável iterada. Tal limitação impediu que aliviadores com volumes maiores que os apresentados na corrente monografia pudessem ser avaliados.

Quanto aos aliviadores idealizados, há bastante a ser implementado. Inicialmente os resultados do corrente trabalho possibilitam um processo de avaliação de qual tipo de aliviador tem o potencial de gerar mais ganhos ao reinício do escoamento. Da mesma forma, os problemas práticos do projeto de cada aliviador, introduzidos na Seção 3.3.3, devem ser explorados de forma a definir qual tipo de aliviador possui um potencial de aplicação mais realista.

Estudos de variação de outros parâmetros dos aliviadores de pressão, como a área de entrada, a resistência hidráulica e o coeficiente isentrópico do gás, também podem ser realizados. Volumes totais dos aliviadores divididos de forma desigual entre esses elementos também poderiam ser avaliados. Outras posições que não as de 10, 30, 50, 70 e 90% de distância da entrada poderiam ser também iteradas. Além disso, outros conceitos para aliviadores de pressão poderiam ser explorados, como por exemplo o do uso de um sistema massa-mola que rege o comportamento de um êmbolo móvel, ao invés de um gás isentrópico.

Além disso, recomenda-se a introdução de uma equação para o amortecimento do aliviador tipo êmbolo. Da forma que o êmbolo é atualmente modelado, ele não possui resistência a seu movimento, o que pode não ser realista para mudanças

bruscas de pressão. Quanto ao aliviador resistivo, sugere-se um estudo maior quanto a seu parâmetro de resistência hidráulica, de forma a apresentar um comportamento mais realista. Por fim, sugere-se que uma análise seja feita quanto o comportamento do gás dentro do aliviador tipo êmbolo, de forma a avaliar se a hipótese de expansão isentrópica é válida ou se outra modelagem apresenta resultados mais fidedignos.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. D. **Modern Compressible Flow: With Historical Perspective**. 2<sup>a</sup> ed. Estados Unidos. McGraw-Hill, 1990.

BAUTISTA, F.; SANTOS, J. M.; PUIG, J. E.; MANERO, O. **Understanding thixotropic and antithixotropic behavior of viscoelastic micellar solutions and liquid crystalline dispersions. I. The model**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999.

BARNES, H. A. **Thixotropy – a review**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1997.

BARNES, H. A. **The Yield Stress – a review**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1997.

BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C.; HASSANGER, O. **Dynamics of Polymeric Liquids, Volume I Fluid Mechanics**. Wiley-Interscience, 1987.

BJØRKEVOLL, K. S.; ROMMETVEIT, R.; AAS, B.; GJERALDSTVEIT H.; MERLO, A. **Transient Gel Breaking Model for Critical Wells Applications with Field Data Verification**. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, SPE/IADC 79843, 2003.

CAWKWELL, M.; CHARLES, M. **An Improved Model for Start-up of Pipelines containing Gelled Crude Oil**. Journal of Pipelines, 1987.

CHANG, C.; RØNNINGSEN, H.; NGUYEN, Q. **Isothermal Start-up of Pipeline Transporting Waxy Crude Oil**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999.

DAVIDSON, M. R.; CHANG, C.; RØNNINGSEN, H. P.; NGUYEN, Q. D. **A Model for Restart of a Pipeline with Compressible Gelled Waxy Crude Oil**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2004.

FREUND, M.; MÓZES, G. **Paraffin Products: Properties, Technologies, Applications**. Akad. Kiadó, 1982.

HARTNETT, J. P.; HU, R. Y. Z. **The yield stress—an engineering reality**. Journal of Rheology, 1989.

HOUSKA, M. **Engineering aspects of the rheology of thixotropic liquids**. Tese de PhD, Czech Technical University of Prague-CVUT, Prague, 1981.

LARSON, A. **Oil. The Geopolitics of Oil and Natural Gas**. New England Journal of Public Policy, 2007. Disponível em: <http://scholarworks.umb.edu/nejpp/vol21/iss2/18> Acesso em: 20 janeiro de 2014.

MEWIS, J.; WAGNER, M. J. **Thixotropy**, Adv. Colloid Interface Sci., 2009.

MOORE, F. **The rheology of ceramic slips and bodies**. Transactions and Journal of the British Ceramic Society, 1959.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N., BOETTNER, D. D., BAILEY, M. B. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Wiley, 7 ed, 2010.

MUJUMDAR, A.; BERIS, A. N.; METZNER A. B. **Transient phenomena in thixotropic systems**. J Non-Newtonian Fluid Mech, 2002.

NEDER, V. **Custo para explorar pré-sal de Libra pode chegar a US\$ 400 bilhões**. O Estado de São Paulo, 2013. Disponível em: <http://economia.estadao.com.br/noticias/economia-geral,custo-para-explorar-pre-sal-de-libra-pode-chegar-a-us-400-bilhoes,169408,0.htm> Acesso em: 20 janeiro de 2014.

NEGRÃO, C. O. R.; FRANCO, A. T.; ROCHA, L. L. V. **A Weakly Compressible Flow Model for the Restart of Thixotropic Drilling Fluids**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2011.

OLIVEIRA, G. M. H. **Numerical Simulation of the Start-up of Bingham Fluid Flows in Pipelines**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2010.

OLIVEIRA, G. M. H. **Modelagem da Propagação de Pressão no Reinício do Escoamento de Fluidos de Perfuração Não Gelificados**. Monografia do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, UTFPR, 2011.

OLIVEIRA, G. M. H., NEGRÃO, C. O. R. **The Effect Flow Compressibility on the Start-up of Waxy Crude Oils**. Em etapa de revisão. Submetido ao Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2014.



PETROBRAS. **Exploração e Produção de Petróleo e Gás**, 2009. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/exploracao-producao-petroleo-gas/> Acesso em: 20 janeiro de 2014.

PETROBRAS MAGAZINE. **Um Desafio Atrás do Outro**, 2009. Edição 56. Disponível em: <http://www.hotsitespetrobras.com.br/petrobrasmagazine/Edicoes/edicao56/pt/internas/pre-sal/> Acesso em: 03 março de 2014.

QUEMADA, D. **Rheological modelling of complex fluids: IV: Thixotropic and “thixoelastic” behaviour. Start-up and stress relaxation, creep tests and hysteresis cycles**. The European Physical Journal, 1999.

SAKER. **Simulation in the oil & gas sector**, 2007. Disponível em: <http://www.sakersolutions.com/media/wp/wp008.html> Acesso em: 20 janeiro de 2014.

SESTAK, J.; CAWKWELL, M.; CHARLES, M.; HOUSKAS, M. **Start-up of Gelled Crude Oil Pipelines**. Journal of Pipelines, 1987.

SOUZA MENDES, P. R. **Modeling the thixotropic behaviour of structured fluids**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2009.

SOUZA MENDES, P. R. **Thixotropic elasto-viscoplastic model for structured fluids**. Soft Matter, 2011.

SOUZA MENDES, P. R.; THOMPSON, R. L. **A unified approach to model elasto-viscoplastic thixotropic yield-stress materials and apparent yield-stress fluids**. Rheologica Acta, 2013.

VINAY, G.; WACHS, A.; AGASSANT, J. F. **Numerical Simulation of Weakly Compressible Bingham Flows: The Restart of Pipeline Flows of Waxy Crude Oils**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2006.

VINAY, G.; WACHS, A.; FRIGAARD, I. **Start-up Transients and Efficient Computation of Isothermal Waxy Crude Oil Flows**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2007.

WACHS, A.; VINAY, G.; FRIGAARD, I. **A 1.5D Numerical Model for the Start up of Weakly Compressible Flow of a Viscoplastic and Thixotropic Fluid in Pipelines**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2009.

WYLIE, E. B; STREETER, V. L.; SUO, L.; **Fluid Transients in Systems.** Prentice Hall, 1993.

YZIQUIEL, F.; CARREAU, P.; MOAN, M., TANGUY, P. **Rheological modelling of concentrated colloidal suspensions.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999.