

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**VITOR ANTONIO DE PAULA CHEVITARESE**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM TUBULAÇÕES COM ESCOAMENTO BIFÁSICO**  
**AR/ÁGUA CONTEMPLANDO CURVAS DE DIFERENTES RAIOS**

**SANTOS/SP**

**2017**

**VITOR ANTONIO DE PAULA CHEVITARESE**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM TUBULAÇÕES COM ESCOAMENTO BIFÁSICO  
AR/ÁGUA CONTEMPLANDO CURVAS DE DIFERENTES RAIOS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Santa Cecília como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Mestre  
no Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica, sob a orientação do  
Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e  
coorientação do Prof. Dr Aldo Ramos Santos  
e Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes.

**SANTOS/SP**

**2017**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Chevitarese, Vitor Antonio de Paula  
Análise de tensões em tubulações com escoamento bifásico ar/  
água contemplando curvas de diferentes.  
/Vitor Antonio de Paula Chevitarese. - 2017  
n. de f. 104.

Orientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior  
Coorientador: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e Prof. Dra.  
Marlene Silva de Moraes

Dissertação (Mestrado)- Universidade Santa Cecília,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2017.

1. Escoamento bifásico. 2. Vibração. 3. Forças dinâmicas  
em tubulação. 4. Análise de tensões em tubulação.

I. De Moraes Júnior, Deovaldo, orientador  
II. Ramos, Aldo Santos, coorientador  
III. De Moraes, Marlene Silva, coorientadora  
IV. Análise de tensões em tubulação com escoamento bifásico  
ar/água contemplando curvas de diferentes raios.

Elaborada pelo SIBI – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta.

## DEDICATÓRIA

*Dedico aos meus pais Maria do Carmo e Wilson Chevitarese, aos meus avós Maria do Carmo e Antônio Carlos de Paula e à minha esposa Denise, pelo incondicional apoio em todos os momentos de minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço,

Ao meu orientador Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior por ter me recebido de braços abertos e me dado a oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus coorientadores Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes pela sua valiosa orientação acadêmica.

Ao amigo e Engenheiro Fábio dos Santos Gama pela ajuda incondicional nos momentos de maior dificuldade.

Ao corpo docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelas orientações na área acadêmica.

À Universidade Santa Cecília, pelo acolhimento e contribuição para o alcance desse objetivo.

A Deus por todas as bênçãos recebidas e as não percebidas.

## RESUMO

Sistemas de tubulações são empregados em grande escala em plantas industriais. Sua função é o transporte de fluidos de forma segura e eficiente ao longo da vida útil prevista para a instalação. O rompimento acidental de uma tubulação industrial pode gerar grandes prejuízos decorrentes da paralização de produção, além de prejuízos de valor inestimável, como a perda de vidas humanas, a contaminação do meio ambiente e incêndios. Cabe à equipe de projeto a análise da tubulação como um elemento mecânico, de forma que tenha resistência estrutural suficiente para suportar todos os esforços a ela impostos. Entre as causas responsáveis pelo rompimento de tubulações pode-se citar a falha por fadiga, que tem como uma das principais causas, a vibração da tubulação originada pelo escoamento bifásico no padrão pistonado (*Slug Flow*). As vibrações em tubulações ocorrem principalmente em singularidades, como pontos de mudança de direção. O presente estudo teve como objetivo a análise das tensões estáticas e dinâmicas de tubulações horizontais submetidas à vibração induzida pelo escoamento bifásico no padrão pistonado, composto por ar e água. Foram propostos três arranjos de tubulação em aço carbono, com diâmetro nominal de 1" (in), montados na posição horizontal, que utilizaram curvas com ângulo de 90° e três diferentes raios de curvatura ( $R=1D$ ,  $R=2D$  e  $R=3D$ ). Os cenários avaliados corresponderam a quatro diferentes frações de ar 10%, 25%, 50% e 75%, e cinco diferentes velocidades 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s e 10 m/s. O programa CAESAR II, Versão 5.10 foi utilizado para a análise dos três arranjos de tubulação. As respostas obtidas na simulação dinâmica mostraram que, tendo como referência as curvas de raio 1D, os sistemas de tubulação que utilizaram curvas de raio 3D e 5D apresentaram uma redução média de 34,5% e 44% das tensões atuantes, 18,8% e 29% dos esforços atuantes nas restrições, 19,5% e 30,7% dos deslocamentos do ponto médio das curvas e, 18,7% e 30,7% das forças atuantes nas curvas, respectivamente. Os resultados mostraram que em tubulações submetidas ao escoamento bifásico em regime pistonado, a utilização de curvas de maior raio de curvatura reduziu o nível das solicitações dinâmicas impostas à tubulação, atenuando os efeitos da vibração.

**Palavras-Chave:** Escoamento bifásico. Vibração em tubulação. Tensões e forças dinâmicas em tubulação. Análise de tensões em tubulação.

## ABSTRACT

Piping systems are employed on a large scale in industrial plants. Its function is to transport fluids safely and efficiently over the expected installation life. The accidental disruption of an industrial pipe can generate great damages due to the paralysis of production, besides priceless damages, as the loss of human lives, the contamination of the environment and fires and. It is up to the design team to analyze the piping as a mechanical element, so that it has sufficient structural strength to withstand all the stresses imposed upon it. Among the causes responsible for the rupture of pipes can be mentioned fatigue failure, which has as one of the main causes, the vibration of the pipe originated by the biphasic flow in the piston pattern (Slug Flow). The vibrations in pipes occur mainly in singularities such as points of change of direction. The present study had as objective the analysis of the static and dynamic tensions of horizontal pipes submitted to the vibration induced by the biphasic flow in the piston pattern, composed by air and water. Three carbon steel pipe arrays with a nominal diameter of 1 "(in), horizontally mounted using 90 ° angle curves and three different curvature radius ( $R=1D$ ,  $R=2D$  and  $R=3D$ ) were proposed. The evaluated scenarios corresponded to four different fractions of air 10%, 25%, 50% and 75% and five different velocities 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s and 10 m/s. The CAESAR II, Version 5.10 program was used for the analysis of the three piping arrangements. The results showed that, with reference to the 1D radius curves, the tubing systems using 3D and 5D radius curves showed a mean reduction of 34,5% and 44% of the operating voltages, 18,8% and 29% of the (19,5% and 30,7%) of the displacements of the midpoint of the curves, and 18,7% and 30,7% of the forces acting on the curves, respectively. The results showed that in pipes subjected to two - phase flow in the piston regime, the use of curves with a greater radius of curvature reduced the level of the dynamic stresses applied to the pipe, attenuating the effects of vibration.

**Keywords:** Biphasic flow. Piping Vibration. Tensions and dynamic forces in piping. Analysis of stresses in piping.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Padrões de escoamento bifásico em tubulação horizontal. ....	18
Figura 2: Célula unitária - Padrão pistonado ou em golfada. ....	20
Figura 3: Mapa padrão de escoamento para fluxo horizontal ar e água - Petalas & Aziz. ....	22
Figura 4: Volume de controle de um trecho de tubulação. ....	28
Figura 5: Espectro da força em função do tempo. ....	37
Figura 6: Representação das forças originadas no escoamento bifásico. ....	38
Figura 7: Representação das forças atuantes nas curvas. ....	39
Figura 8: Tubo de corrente. ....	39
Figura 9: Forças incidentes em um tubo de corrente. ....	41
Figura 10: Trecho de tubulação analisado. ....	47
Figura 11: Mapa de escoamentos - Petalas & Aziz. ....	51
Figura 12: Forças induzidas na tubulação. ....	53
Figura 13: História do tempo ( <i>Time hitory</i> ). ....	57
Figura 14: Tensões médias atuantes na tubulação (Casos estáticos). ....	63
Figura 15: Esforços médios atuantes nas restrições (Caso estático). ....	66
Figura 16: Força atuante no ponto médio das curvas (Casos estáticos). ....	69
Figura 17: Tensões médias atuantes na tubulação. ....	78
Figura 18: Esforços médios atuantes nas restrições. ....	83
Figura 19: Deslocamentos dos pontos médios das curvas. ....	89
Figura 20: Deslocamentos da tubulação. ....	90
Figura 21: Forças atuantes no ponto médio das curvas. ....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades dos fluidos.....	48
Tabela 2: Características da tubulação.....	48
Tabela 3: Tensões admissíveis na tubulação. ....	48
Tabela 4: Cenários avaliados para os três arranjos de tubulação.....	52
Tabela 5: Forças induzidas na tubulação.....	54
Tabela 6: Tempo de rampa e de degrau em milésimos de segundo (ms). ....	56
Tabela 7: Tempo de defasagem em milésimos de segundo [ms]. ....	56
Tabela 8: Tempos de passagem do pistão de líquido.....	58
Tabela 9: Tensões atuantes na tubulação. ....	61
Tabela 10: Esforços atuantes nas restrições. ....	64
Tabela 11: Deslocamentos dos pontos médios das curvas. ....	67
Tabela 12: Forças atuantes no ponto médio das curvas.....	68
Tabela 13: Frequências naturais de vibração. ....	71
Tabela 14: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 10\%$ ).73	
Tabela 15: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 25\%$ ).74	
Tabela 16: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 50\%$ ).75	
Tabela 17: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 75\%$ ).76	
Tabela 18: Percentual médio de redução das tensões atuantes nas curvas (Resumo). ....	76
Tabela 19: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 10\%$ ).....	79
Tabela 20: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 25\%$ ).....	80
Tabela 21: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 50\%$ ).....	81

Tabela 22: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 75\%$ ).....	82
Tabela 23: Percentual médio de redução dos esforços atuantes nas restrições (Resumo). ....	82
Tabela 24: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 10\%$ )....	85
Tabela 25: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 25\%$ )....	86
Tabela 26: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 50\%$ )....	87
Tabela 27: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 75\%$ )....	88
Tabela 28: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas (Resumo)....	88
Tabela 29: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 10\%$ ). ....	92
Tabela 30: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 25\%$ ). ....	93
Tabela 31: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 50\%$ ). ....	94
Tabela 32: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 75\%$ ). ....	95
Tabela 33: Percentual médio de redução das forças atuantes nas curvas (Resumo). ....	95

## LSTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleração.....	(m/s <sup>2</sup> )
A	Área interna do tubo.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>L</sub>	Área do tubo ocupada pelo líquido.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>G</sub>	Área do tubo ocupada pelo gás.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>1</sub>	Área da seção de entrada do tubo.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>2</sub>	Área da seção de saída do tubo.....	(m <sup>2</sup> )
D <sub>n</sub>	Diâmetro nominal de um tubo.....	(m)
D <sub>i</sub>	Diâmetro interno de um tubo.....	(m)
$\frac{dm_1 V_1}{dt}$	Variação da quantidade de movimento na seção de entrada	
$\frac{dm_2 V_2}{dt}$	Variação da quantidade de movimento na seção de entrada	
F	Força resultante que age sobre o fluido... ..	(N)
F <sub>s</sub>	Força no fluido devido às tensões longitudinais.....	(N)
F <sub>sx</sub>	Força resultante na direção x.....	(N)
F <sub>sy</sub>	Força resultante na direção 'Y' .....	(N)
F <sub>n</sub>	Frequência natural de vibração.....	(Hz)
G	Força da gravidade.....	(Kgf)
HP	Pressão de teste hidrostático.....	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
J	Velocidade superficial média da mistura.....	(m/s)
J <sub>L</sub>	Velocidade superficial do líquido.....	(m/s)
J <sub>G</sub>	Velocidade superficial do gás.....	(m/s)
J <sub>G1</sub>	Velocidade superficial do gás na seção 1 do tubo.....	(m/s)
J <sub>G2</sub>	Velocidade superficial do gás na seção 2 do tubo.....	(m/s)
m	Massa.....	(Kg)
n <sub>1</sub>	Versor na seção de entrada de um tubo	
n <sub>2</sub>	Versor na seção de saída de um tubo	
P1	Pressão de operação de um fluido.....	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
P2	Pressão de projeto de um fluido.....	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
P <sub>G1</sub>	Pressão do gás na seção 1 do tubo.....	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
P <sub>G2</sub>	Pressão do gás na seção 2 do tubo.....	(Kgf/cm <sup>2</sup> )

$Q_L$	Vazão de líquido.....	( $m^3/s$ )
$Q_G$	Vazão de gás.....	( $m^3/s$ )
$Q_m$	Vazão mássica.....	(Kg/s)
$Q_{G1}$	Vazão volumétrica na seção 1 do tubo.....	( $m^3/h$ )
$Q_{G2}$	Vazão volumétrica na seção 2 do tubo.....	( $m^3/h$ )
$S_C$	Tensão admissível a frio do tubo.....	(Kg/cm <sup>2</sup> )
$S_H$	Tensão admissível a quente.....	(Kg/cm <sup>2</sup> )
$S_A$	Tensão admissível devido a dilatação.....	(Kg/cm <sup>2</sup> )
$T_1$	Temperatura de operação de um fluido.....	(°C)
$T_2$	Temperatura de projeto de um fluido.....	(°C)
$U_L$	Velocidade real do líquido.....	(m/s)
$U_G$	Velocidade real do gás.....	(m/s)
$U_{LD}$	Velocidade de escorregamento do líquido.....	(m/s)
$U_{GD}$	Velocidade de escorregamento do gás.....	(m/s)
$V$	Volume localizado porção do tubo.....	( $m^3$ )
$V_L$	Volume localizado de líquido.....	( $m^3$ )
$V_G$	Volume localizado de gás.....	( $m^3$ )
$W$	Peso de um fluido.....	(Kg/m)
$WW$	Peso próprio da tubulação.....	(Kg/m)
$\alpha_L$	Fração volumétrica localizada de líquido.....	(%)
$\alpha_G$	Fração volumétrica localizada de gás.....	(%)
$\lambda$	Fração volumétrica de líquido.....	( $m^3$ )
$\beta$	Fração volumétrica de gás.....	( $m^3$ )
$\rho_m$	Densidade média da mistura.....	(Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_L$	Densidade do líquido.....	(Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_G$	Densidade do gás.....	(Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{G1}$	Massa específica na seção 1 do tubo .....	(Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{G2}$	Massa específica na seção 1 do tubo .....	(Kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma_c$	Tensão circunferencial da tubulação.....	(Kpa)
$\sigma_l$	Tensão longitudinal da tubulação.....	(Kpa)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 Generalidades .....	15
1.2 Objetivo .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 Padrões de escoamento.....	17
2.2 Mapas de escoamento .....	21
2.3 Principais parâmetros do escoamento bifásico .....	22
2.3.1 Velocidade local de líquido e de gás.....	22
2.3.2 Fração de fase .....	23
2.3.3 Velocidade superficial .....	24
2.3.4 Frações volumétricas localizadas de líquido e de gás .....	24
2.3.5 Frações volumétricas de líquido e gás.....	26
2.3.6 Densidade média da mistura.....	26
2.3.7 Velocidade de escorregamento.....	27
2.3.8 Análise do padrão de escoamento ao longo da tubulação.....	27
2.4 Esforços e tensões atuantes em tubulações .....	29
2.4.1 Esforços estáticos e dinâmicos .....	29
2.4.2 Tensões primárias, secundárias e relaxamento espontâneo .....	31
2.4.3 Tensões admissíveis em tubulações .....	31
2.5 Análise de tensões em tubulações .....	33
2.5.1 Considerações iniciais .....	33
2.5.2 Análise estática .....	34
2.5.3 Análise dinâmica .....	34
2.5.4 Descrição do método espectro de resposta.....	35
2.5.5 Estimativa dos tempos de rampa e de degrau .....	36
2.5.6 Tempo de defasagem .....	38
2.6 Forças induzidas pelo escoamento bifásico .....	39
2.6.1 Equação da quantidade de movimento.....	39
2.7 Trabalhos referentes à vibração induzida em tubulações .....	43
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>
3.1 Análise computacional.....	45
3.1.1 Modelagem numérica.....	45

3.1.2 Modelos analisados .....	46
3.1.3 Propriedades do fluido conduzido e da tubulação.....	48
3.1.4 Casos avaliados.....	49
3.1.5 Frequência natural da tubulação.....	49
3.1.6 Cenários avaliados.....	49
3.1.7 Cálculo da força induzida.....	53
3.1.8 Tempos de rampa e de degrau ( $t_r$ e $t_d$ ) .....	55
3.1.9 Tempo de defasagem .....	56
3.1.10 Determinação dos tempos de passagem ( $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ ) .....	57
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>60</b>
4.1 Resposta estática da tubulação.....	60
4.1.1 Tensões atuantes na tubulação .....	60
4.1.2 Esforços atuantes nas restrições .....	63
4.1.3 Deslocamento do ponto médio das curvas .....	66
4.1.4 Forças atuantes nas curvas .....	68
4.2 Comportamento dinâmico da tubulação .....	70
4.2.1 Frequência natural de vibração (Modal).....	71
4.2.2 Tensões atuantes na tubulação .....	72
4.2.3 Esforços atuantes nas restrições .....	78
4.2.4 Deslocamento do ponto médio das curvas .....	84
4.2.5 Força atuante no ponto médio das curvas .....	91
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>97</b>
5.1 Conclusões referentes à análise estática .....	97
5.2 Conclusões referentes à análise dinâmica .....	98
5.3 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES.....	99
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>102</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Generalidades

Em projetos de tubulação de vários segmentos industriais, com destaque para as unidades de produção e processamento de petróleo e gás, constata-se grande incidência de linhas com escoamento bifásico, que podem ocorrer em diferentes padrões de escoamento, caracterizados principalmente em função das velocidades superficiais e frações de vazão das fases presentes. Normalmente as linhas com escoamento bifásico são identificadas pela equipe de processo, cabendo à equipe de tubulação um tratamento diferenciado durante a fase de elaboração do projeto, com objetivo de atenuar os efeitos da vibração decorrentes da variação da quantidade de movimento, que é função do ângulo de mudança de direção do escoamento, pressão, velocidade, área da seção da tubulação e da diferença de densidades das fases dos fluidos presentes, constituídos na indústria em larga escala por líquido e gás.

Os efeitos da vibração são altamente prejudiciais à tubulação, sendo a fadiga a principal causa de falhas e abreviação de sua vida útil. Os efeitos nocivos da vibração não se restringem a tubulação principal, podendo afetar ramais interligados, drenos, respiros, tomados de utilidades e de instrumentação, normalmente constituídas por tubulações de pequeno diâmetro, menor ou igual a 1½” (38 mm), que apresentam menor rigidez estrutural, portanto mais susceptíveis a vibração. Os esforços dinâmicos que atuam nos pontos de apoio requerem atenção especial no projeto de suportes de tubulação e bases civis, exigindo estruturas mais robustas e conseqüentemente um maior custo final. Entre os efeitos indiretos da vibração está a sua propagação para outros sistemas de tubulação, que utilizam o mesmo suporte ou estrutura de sustentação.

Almeida (2012) informou em seu estudo relacionado à vibração em tubulações, que no ano de 2001, o órgão Britânico *Health and Safety Executive* identificou que 41% dos vazamentos de hidrocarbonetos em unidades flutuantes de produção de petróleo do Mar do Norte, ao longo de 12 meses, foram atribuídos à falhas em tubulações industriais. Desse total, 11% das falhas foram causadas por vibração. No ano de 2009, a Agência de Energia Nuclear – NEA identificou ao longo de 38 anos, 321 vazamentos externos, sendo que 38% foram causados por

fadiga decorrente de vibração. Desse total, 52% são atribuídos a tubulações com diâmetro nominal até 1" (25,4 mm).

Ações mitigadoras devem ser consideradas na fase de execução do projeto de tubulação, com objetivo de reduzir os níveis de vibração presentes em tubulações com escoamento bifásico. Vibrações de grande amplitude são detectadas durante as fases de comissionamento e partida em plantas de processamento de petróleo e gás. Não é raro o rompimento de ramais de pequeno diâmetro causados por vibração. Esses incidentes geram trabalhos adicionais às equipes de projeto, produção e qualidade, causando além de custo adicional, forte impacto no cronograma. São poucos os dados da literatura referentes aos problemas industriais e soluções que contemplam vibração induzida pelo escoamento bifásico.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo do presente trabalho foi avaliar os níveis das solicitações estáticas e dinâmicas presentes em três conjuntos de tubulação, que utilizaram curvas de raio 1D, 3D e 5D, montados na posição horizontal e submetidos ao escoamento bifásico no padrão pistonado, composto por ar e água, com frações de fase de 10%, 25%, 50% e 75% e, velocidades médias de escoamento de 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s e 10 m/s. As análises foram efetuadas através do estudo comparativo das tensões estáticas e dinâmicas atuantes, com as tensões admissíveis na tubulação. Foram também avaliados os esforços atuantes nos pontos de apoio e restrições, os deslocamentos e as forças atuantes nos pontos médios das curvas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Padrões de escoamento

Barbosa Filho (2011) descreve que as substâncias podem ocorrer na natureza em três fases distintas, que são as fases sólida, líquida e gasosa. De forma similar, o escoamento dos fluidos em tubulações industriais pode ocorrer em uma ou mais fases, denominados escoamento monofásico e multifásico, respectivamente. As fases que compõe o escoamento podem ser de mesma substância ou substâncias diferentes. Os fundamentos do escoamento monofásico, seja ele compressível ou incompressível, são bastante conhecidos, o mesmo não ocorrendo para o escoamento multifásico. No grupo dos multifásicos, o escoamento bifásico constituído por líquido e gás apresenta grande incidência em plantas de processo, principalmente nos segmentos de petróleo e gás e petroquímicos.

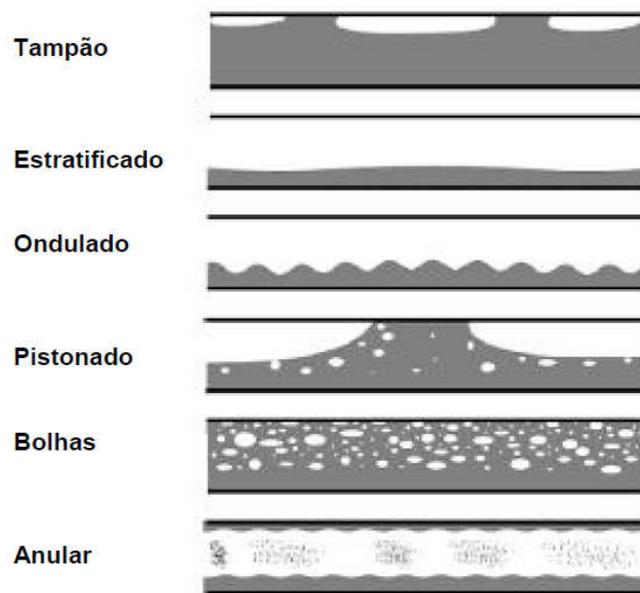
Heloui (2008) informou que escoamento bifásico no interior de um tubo podem assumir diferentes padrões, variando em função da configuração das interfaces das fases presentes. A fração volumétrica e a velocidade superficial das fases, assim como a geometria do duto, constituem os principais fatores para caracterização dos padrões de escoamento. Com referência à distribuição de fases, está é fortemente influenciada pela direção do escoamento com relação à gravidade. As propriedades físicas dos fluidos tais como densidade, viscosidade e tensão superficial também influenciam no padrão de escoamento.

Hubbard & Dukler (1966) definiram os padrões de escoamento em três formas básicas, que são: Separado, intermitente e disperso. No padrão separado as fases são contínuas, não existindo a quebra de cada fase ao longo do trajeto, tendo como exemplo, o padrão estratificado, ondulado e anular (Figura 1). No padrão intermitente uma das fases se separa ao longo da tubulação, tendo nesse caso, uma porção de líquido e uma porção de gás. O padrão pistonado e tampão representam esse padrão. O padrão disperso se caracteriza por uma porção contínua de líquido, apresentando bolhas de gás dispersas ao longo de todo o comprimento. Para o escoamento com o tubo na posição horizontal, ocorre uma maior concentração de bolhas de gás na seção superior do tubo, devido ao efeito da gravidade.

Os padrões de escoamento também se diferenciam em função da posição de montagem da tubulação. Barnea et.al. (1982) definiram cinco posições de montagem, que podem ser horizontal, vertical ascendente e descendente e, inclinada ascendente e descendente.

Considerando que o presente estudo efetuou a análise de arranjos de tubulação na posição horizontal, a descrição pormenorizada dos padrões de escoamento ficou restrita a esta posição.

Conforme apresentado na Figura 1, os principais padrões de escoamento são:



**Figura 1: Padrões de escoamento bifásico em tubulação horizontal.**  
(Fonte: Heloui, 2008)

#### **a) Padrão tampão (*Plug flow*)**

O padrão tampão é característico de escoamentos que ocorrem há baixa pressão. Devido aos efeitos da gravidade, a porção líquida fica depositada na parte inferior do tubo. Bolsas alongadas e intermitentes de gás se formam na região superior do tubo.

#### **b) Padrão estratificado (*Stratified flow*)**

No padrão estratificado o líquido esco de forma contínua na região inferior do tubo. Uma camada de gás contínua se concentra na região superior, separados por uma interface suave e uniforme. Em sistemas com pequenas

frações de líquido e de gás, com velocidades moderadas, predominam esse padrão de escoamento.

#### **c) Padrão ondulado (*Wave flow*)**

O padrão ondulado pode ser considerado um caso particular do padrão estratificado. À medida que se aumenta a vazão de gás, aumenta-se a velocidade do escoamento, gerando perturbações em forma de onda na interface da fração líquida. Essas ondas podem aumentar de tamanho em função do aumento da velocidade do gás, atingido a geratriz superior do tubo. O gás ficará retido entre duas ondas.

#### **d) Padrão pistonado ou em golfadas (*Slug flow*)**

O padrão pistonado ou em golfadas é uma evolução do padrão bolhas alongadas, proporcionado pelo aumento da velocidade do líquido. Nesse caso ocorre um aumento do comprimento da onda, que mantém retida uma porção de gás entre duas ondas. Observa-se também a presença de bolhas de gás na fração líquida. Esse tipo de escoamento ocorre com bastante frequência, exigindo tratamento especial por parte da equipe de projeto, devido aos efeitos indesejáveis que causam na tubulação, como forças dinâmicas de diferentes intensidades e conseqüentemente vibração.

#### **e) Padrão bolhas dispersas (*Bubbly flow*)**

Neste padrão as bolhas de gás apresentam-se dispersas na fração de líquido. Devido aos efeitos gravitacionais, as bolhas concentram-se preferencialmente na parte central e superior da seção do tubo. Esse padrão de escoamento é característico para grandes vazões de líquido e gás. Dependendo do nível de agitação das corrente fluidas, as bolhas poderão ocupar toda a seção do tubo. Um dos efeitos indesejáveis desse padrão de escoamento é a ocorrência do fenômeno de cavitação.

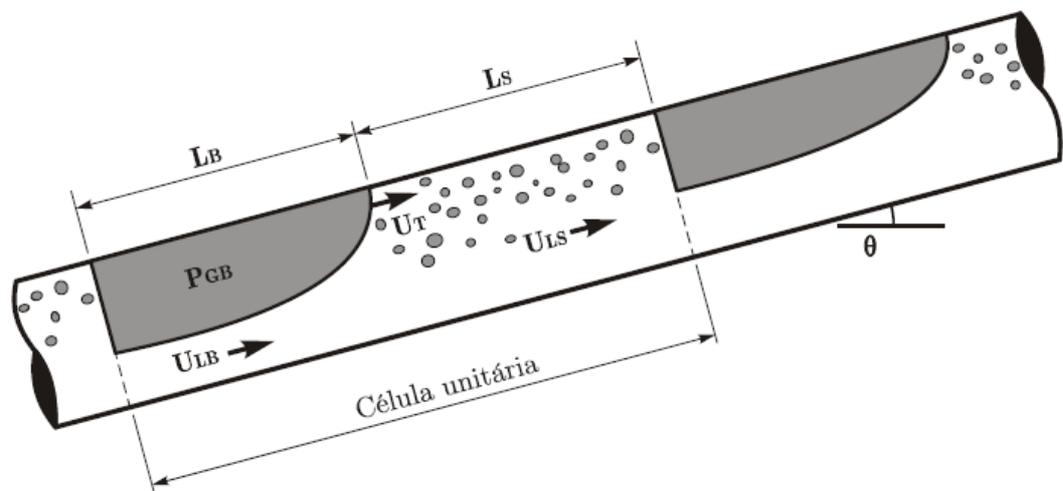
#### **f) Padrão anular (*Annular flow*)**

Em escoamentos bifásicos caracterizados por elevadas vazões de gás faz-se presente o padrão anular.. Devido a grande velocidade do gás, este abre caminho, escoando pela região central da seção tubular, expulsando o líquido para a região periférica, adjacente as paredes. Devido aos efeitos da gravidade, a

espessura do anel líquido na região inferior do tubo é maior comparativamente a região superior.

Uma consideração especial deve ser feita ao padrão pistonado ou em golfada, devido à maior ocorrência e aos efeitos dinâmicos que provoca na tubulação. Estudos experimentais efetuados por Heloui (2008) e Raeder (2012), demonstraram que a intermitência das fases é responsável pelo desbalanceamento hidráulico da tubulação. Barbosa Filho (2011) mostrou que esse tipo de escoamento não apresenta características geométricas constantes ao longo do tempo, podendo ocorrer variações dimensionais em um mesmo ponto da tubulação e ao longo seu comprimento. O escoamento no padrão pistonado é formado por um conjunto de células unitárias. Cada célula unitária é formada por um pistão de líquido e uma bolha de ar, também conhecida como Bolha de Taylor. O comprimento das bolhas de líquido e gás varia de célula para célula. Em trabalhos de campo para medição de vibração, os dados experimentais obtidos referentes à força e frequência de vibração devem ser repetidos e tratados estatisticamente, de forma que os tornem representativos.

A Figura 2 apresenta o desenho de uma célula unitária, sendo  $L_B$  e  $L_S$  o comprimento do pistão de líquido e da bolha de gás,  $U_{LS}$  e  $U_{LB}$  a velocidade do líquido no pistão de líquido e no filme de líquido, respectivamente.  $U_T$  é a velocidade de translação da bolha e  $P_G$  a pressão de gás no interior da bolha.



**Figura 2: Célula unitária - Padrão pistonado ou em golfada.**

Fonte: Rodrigues (2009)

## 2.2 Mapas de escoamento

Os mapas de escoamento bifásico são utilizados para caracterização dos padrões de escoamento. Nos mapas estão representadas as configurações das interfaces de dois diferentes fluidos escoando no interior de um tubo. Esses mapas podem ser elaborados de duas formas diferentes. A forma mais utilizada consiste na coleta de dados efetuada de forma empírica, utilizando-se modelos físicos. A caracterização do padrão de escoamento é realizada visualmente utilizando-se câmeras fotográficas de alta velocidade em tubulações transparentes. A outra forma se baseia na análise de mecanismos físicos de transição entre padrões, modelados por equações fundamentais.

Em projeto de tubulação, cabe à equipe de processo a elaboração da folha de dados de tubulação. Além das informações padrão inerentes a cada linha, como pressão, temperatura e massa específica, entre outras, as fases dos fluidos são informadas, sendo dedicado um tratamento especial às linhas com escoamento bifásico por parte da equipe de projeto de tubulação, principalmente quando detectado o padrão pistonado ou em golfadas.

Estudos experimentais efetuados por diferentes autores culminaram na elaboração de diferentes mapas de escoamento. Normalmente, os mapas padrão de escoamento são aplicados a condições específicas de escoamento, que são à direção do fluxo, o diâmetro do tubo e o tipo de fluido.

Baker (1954) criou um mapa padrão de escoamento para fluxo horizontal, composto por ar e água, em condições padrão, operando com pressão de 1 bar e temperatura de 298 Graus Kelvin (K).

Mandhane, et.al. (1974) elaboraram um mapa padrão de escoamento para fluxo horizontal, operando com o ar e água, a 1 atm e 25 °C.

Taitel et. al. (1980) foram responsáveis pela elaboração de um mapa de escoamento para fluxo horizontal e vertical, sendo os fluidos óleo e gás.

Petalas & Aziz (1998) criaram um modelo empírico com largo campo de aplicação, válido para fluxo horizontal e vertical, de diferentes geometrias e fluidos de trabalho. Por se aplicar às condições do escoamento propostas no presente trabalho, adotou-se o mapa elaborado por Petalas & Aziz (1998) para caracterização do padrão de escoamento, como mostrado na Figura 3.

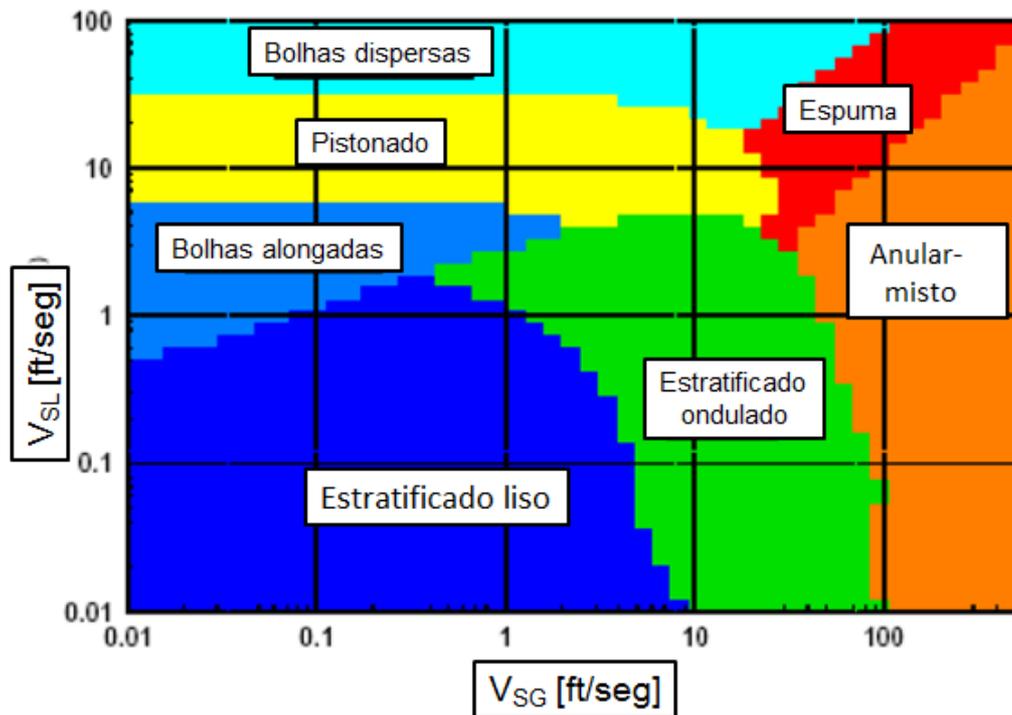


Figura 3: Mapa padrão de escoamento para fluxo horizontal ar e água - Petalas & Aziz.  
 Fonte: Heloui (2008)

Nota:  $V_{SL}$  e  $V_{SG}$  são velocidades superficiais do líquido e do gás, respectivamente.

### 2.3 Principais parâmetros do escoamento bifásico

O escoamento bifásico composto pelas fases líquido e gás pode ocorrer em vários padrões. Cada padrão é caracterizado por diferentes parâmetros de escoamento. Rodrigues (2009) citou em seu trabalho os principais parâmetros considerados no estudo do escoamento bifásico constituído por líquido e gás, descritos na sequência.

#### 2.3.1 Velocidade local de líquido e de gás

A velocidade local do líquido e do gás, mostrada nas Equações 2.1 e 2.2, corresponde à razão entre a vazão de cada fase e a área ocupada por cada fração de fase. A área considerada corresponde à área efetivamente ocupada por cada fase. A velocidade local pode ser entendida como a velocidade real de escoamento de cada fase.

$$U_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (2.1)$$

$$U_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (2.2)$$

Em que,

$U_L$  é a velocidade local do líquido

$U_G$  é a velocidade local do gás

$A_L$  é a área do tubo ocupada pela fase líquida

$A_G$  é a área do tubo ocupada pela fase gasosa

$Q_L$  é a vazão volumétrica de líquido

$Q_G$  é a vazão volumétrica de gás

### 2.3.2 Fração de fase

A fração de fase é definida como a razão entre a área ocupada por uma fase e a área da seção transversal do tubo, como apresentado nas Equações 2.3 e 2.4.

$$R_L = \frac{A_L}{A} \quad (2.3)$$

$$R_G = \frac{A_G}{A} \quad (2.4)$$

Em que,

$R_L$  é a fração de líquido

$R_G$  é a fração de gás

$A$  é a área da seção transversal do tubo

Substituindo as Equações 2.3 e 2.4 nas Equações 2.1 e 2.2, pode-se estabelecer:

$$U_L = \frac{Q_L}{A \cdot R_L} \quad (2.5)$$

$$U_G = \frac{Q_G}{A \cdot R_G} \quad (2.6)$$

### 2.3.3 Velocidade superficial

A velocidade superficial do líquido e do gás, mostrada nas Equações 2.7 e 2.8, corresponde à razão entre a vazão de cada fase e a área total da seção interna do tubo. Podem ser interpretadas como se cada fase estivesse escoando sozinha no interior do tubo. A Equação 2.9 corresponde à velocidade superficial média da mistura.

O conceito de velocidade superficial da fase líquida e gás é utilizado na determinação do padrão do escoamento bifásico. Nos mapas de escoamento as velocidades superficiais do gás e do líquido estão indicadas nos eixos da abcissa e ordenadas, respectivamente, como mostrado na Figura 3.

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.7)$$

$$J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.8)$$

$$J = J_L + J_G \quad (2.9)$$

Em que,

$J$  é a velocidade superficial média da mistura

$J_L$  é a velocidade superficial do líquido

$J_G$  é a velocidade superficial do gás

A velocidade superficial média da mistura também pode ser escrita da forma:

$$J = \frac{Q_L + Q_G}{A} \quad (2.10)$$

### 2.3.4 Frações volumétricas localizadas de líquido e de gás

As frações volumétricas localizadas de líquido e gás são conceitos utilizados na determinação da velocidade real das frações de fase, em seções específicas da tubulação. A determinação das frações volumétricas pode ser obtida experimentalmente medindo-se o volume de líquido retido em um trecho reto de tubulação, através do fechamento rápido de duas válvulas de bloqueio posicionadas nas extremidades do tubo. Outra forma de determinação é a utilização de correlações disponíveis na literatura.

### a) Fração volumétrica localizada de líquido (*Holdup*)

A Fração volumétrica localizada de líquido, como apresentado nas Equações 2.11 e 2.12, é a razão entre o volume de líquido e o volume total do fluido contido em um segmento de tubulação de comprimento específico.

$$\alpha_L = \frac{V_L}{V} \quad (2.11)$$

Utilizando a equação 2.1:

$$U_L = \frac{Q_L}{A_L} = \frac{J_L \times A}{A_L} = \frac{J_L}{\alpha_L} \quad (2.12)$$

Em que,

$\alpha_L$  é a fração volumétrica localizada de líquido (*Holdup*)

$V_L$  é o volume localizado de líquido

$V$  é o volume localizado da porção do tubo

### b) Fração volumétrica localizada de gás (*Void fraction*)

A fração volumétrica de gás, como apresentada nas Equações 2.13 e 2.14, é a razão entre o volume de gás e o volume total do fluido contido em um segmento de tubo de comprimento específico.

$$\alpha_G = \frac{V_G}{V} \quad (2.13)$$

Utilizando a equação 2.2:

$$U_G = \frac{Q_G}{A_G} = \frac{J_G \times A}{A_G} = \frac{J_G}{\alpha_G} \quad (2.14)$$

Em que,

$\alpha_G$  é a fração volumétrica localizada de gás (*Void fraction*)

$V_G$  é o volume localizado de gás

### 2.3.5 Frações volumétricas de líquido e gás

#### a) Fração volumétrica de líquido

Fração volumétrica de líquido é a razão entre a vazão de líquido e a vazão total, podendo também ser expresso em função da velocidade superficial do líquido, como apresentado na Equação 2.15.

$$\lambda = \frac{Q_L}{Q_L + Q_G} = \frac{J_L \times A}{A(J_L + J_G)} = \frac{J_L}{J} \quad (2.15)$$

Em que,

$\lambda$  é a fração volumétrica de líquido

#### b) Fração volumétrica de gás

Fração volumétrica de gás é a razão entre a vazão de gás e a vazão total, podendo também ser expresso em função da velocidade superficial do gás, como apresentado na Equação 2.16.

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_L + Q_G} = \frac{J_G \times A}{A(J_L + J_G)} = \frac{J_G}{J} \quad (2.16)$$

Em que,

$\beta$  é a fração volumétrica de gás

### 2.3.6 Densidade média da mistura

A densidade média da mistura é a densidade proporcional às frações de fase de líquido e gás presentes no escoamento, conforme apresentado na Equação 2.17.

$$\rho_m = \rho_L \cdot \lambda + \rho_G(1 - \lambda) \quad (2.17)$$

Em que,

$\rho_m$  é a densidade média da mistura

$\rho_L$  é a densidade do líquido

$\rho_G$  é a densidade do gás

Por ser o gás um fluido compressível, suas propriedades como densidade, velocidade e pressão não são constantes ao longo do percurso, podendo inclusive ocorrer variação do padrão de escoamento. A simulação da variação das propriedades de escoamento ao longo da tubulação aumentaria significativamente o grau de dificuldade do estudo proposto. No presente trabalho a densidade da mistura foi considerada homogênea e constante ao longo do comprimento da tubulação.

### **2.3.7 Velocidade de escorregamento**

A velocidade de escorregamento de cada fase é definida como a diferença entre a velocidade local da fase e a velocidade média da mistura de fase, como mostrado nas Equações 2.18 e 2.19.

$$U_{GD} = U_G - J \quad (2.18)$$

$$U_{LD} = U_L - J \quad (2.19)$$

Em que,

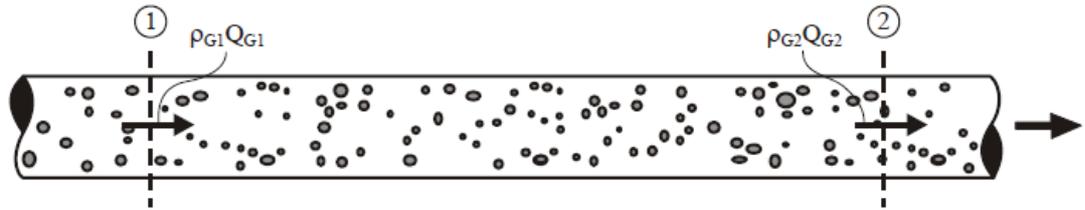
$U_{GD}$  é a velocidade de escorregamento do gás

$U_{LD}$  é a velocidade de escorregamento do líquido

### **2.3.8 Análise do padrão de escoamento ao longo da tubulação**

A fase de líquido e gás que compõe um escoamento bifásico apresentam diferentes propriedades. O escoamento da fase líquida é normalmente considerado incompressível, apresentado a mesma velocidade superficial ao longo das seções do escoamento. Já o escoamento da fase gasosa é compressível, o que faz a sua vazão e conseqüentemente a velocidade superficial variar ao longo do percurso. As frações de líquido e gás não movem em conjunto. A diferença de velocidade entre os fluidos faz com que ocorra um escorregamento entre as fases.

A Figura 4 representa um volume de controle que considera um trecho de tubulação onde ocorre um escoamento bifásico composto por líquido e gás.



**Figura 4: Volume de controle de um trecho de tubulação.**

Fonte: Rodrigues (2009)

Pela equação da conservação de massa, a vazão mássica de gás em regime permanente é igual nas seções do tubo correspondente aos pontos 1 e 2, conforme descrito na Equação 2.20.

$$\rho_{G1} Q_{G1} = \rho_{G2} Q_{G2} \quad (2.20)$$

Em que,

$\rho_{G1}$  e  $\rho_{G2}$  é a massa específica nas seções 1 e 2

$Q_{G1}$  e  $Q_{G2}$  é a vazão volumétrica nas seções 1 e 2

Considerando que a velocidade superficial é a razão entre a vazão e a área da seção, como mostra a Equação 2.21, tem-se:

$$\rho_{G1} J_{G1} = \rho_{G2} J_{G2} \quad (2.21)$$

Admitindo que o escoamento seja isotérmico e o gás ideal, temos a relação dada pela Equação 2.22.

$$\frac{P_G}{\rho_G} = C^{te} \quad (2.22)$$

Aplicando a Equação 2.22 na Equação 2.21, tem-se:

$$J_{G2} = \frac{P_{G1}}{P_{G2}} J_{G1} \quad (2.23)$$

Em que,

$J_{G1}$  e  $J_{G2}$  é a velocidade superficial nas seções 1 e 2

$P_{G1}$  e  $P_{G2}$  é a pressão do gás nas seções 1 e 2

A Equação 2.23 informa que a velocidade superficial do gás na seção 2 é igual à velocidade superficial do gás na seção 1 multiplicada pela razão entre as pressões de entrada e saída. Considerando que o padrão de escoamento é

função da velocidade superficial e esta por sua vez é função da variação da pressão entre as seções consideradas, é possível haja alteração do padrão de escoamento ao longo do comprimento.

Programas avançados de fluidodinâmica computacional são utilizados para simulação do escoamento bifásico, no entanto, não apresentam resultados satisfatórios para alguns padrões de escoamento. Principalmente nas indústrias de petróleo e gás, algumas correlações são utilizadas para o cálculo da perda de pressão por comprimento de tubo ao longo da tubulação. Entre as principais correlações podem-se destacar os seguintes métodos:

#### **a) Método Lockhart & Martinelli**

O método Lockhart & Martinelli considera que as fases líquida e gasosa deslocam-se à mesma velocidade, sem escorregamento e sem consideração quanto ao regime de escoamento.

#### **b) Método de Yagi, Dukler e HTFS**

No método de Yagi, Dukler e HTFS, o escorregamento entre as fases é considerado, mas o regime de escoamento não é considerado.

#### **c) Método de Beggs e Bill**

No método de Beggs e Bill, são considerados o escorregamento e o regime de escoamento.

A perda de pressão por comprimento de tubo, calculada por este método, permite a determinação das pressões ao longo da tubulação e conseqüentemente, das velocidades superficiais das fases, que caracterizarão os padrões de escoamento.

## **2.4 Esforços e tensões atuantes em tubulações**

### **2.4.1 Esforços estáticos e dinâmicos**

Um sistema de tubulações é considerado um elemento estrutural devendo ter resistência suficiente para suportar os esforços incidentes. Silva Telles (2008) definiu os principais esforços atuantes em tubulações. São eles o peso próprio da tubulação, incluindo válvulas e demais acessórios, peso do isolamento térmico,

peso do fluido conduzido, peso decorrente de cargas variadas tais como pessoas, estruturas metálicas apoiadas, instrumentos, outros tubos, cargas decorrentes de ações dinâmicas devido ao movimento do fluido como golpe de aríete, fechamento rápido de válvulas, acelerações, ações dinâmicas externas como vento e terremoto, vibrações, dilatações, contrações térmicas, entre outras.

Todos os esforços citados devem ser considerados na análise estrutural da tubulação, no entanto, os de natureza estática são os mais frequentes e constituem a grande maioria dos casos analisados. Em sistemas de tubulação que apresentam um bom traçado e suportes em pontos adequados, as tensões mais significativas são decorrentes da pressão interna exercida pelo fluido, da expansão térmica da tubulação e dos equipamentos conectados.

França Filho (2013) classifica os esforços atuantes em tubulação em estáticos e dinâmicos. As forças estáticas atuam de forma lenta e progressiva, permitindo uma distribuição interna das solicitações e mantendo a estrutura em equilíbrio. Como exemplos, citam-se a pressão interna, o peso próprio da tubulação e o peso do fluido conduzido. Uma consideração especial deve ser feita as forças dinâmicas, que variam rapidamente com o tempo, provocando desequilíbrio hidráulico devido à ação de esforços desbalanceados.

A análise detalhada dos esforços dinâmicos, quanto à sua intensidade e o tempo de atuação, permite a caracterização de duas modalidades diferentes, que são os esforços permanentes e os transientes. Os esforços permanentes são normalmente de baixa intensidade e atuam de forma periódica, por um tempo relativamente longo. Vibrações originadas pelo fluxo pulsante proveniente de bombas e compressores alternativos e, vibrações decorrentes do fluxo bifásico exemplificam essa modalidade. Importante observar que o fluxo pulsante decorrente da variação da vazão, tal como em equipamentos alternativos, gera uma onda de pressão, que se propaga com a velocidade do som. No caso do escoamento bifásico, o desequilíbrio hidráulico é causado pela variação da quantidade de movimento dos fluidos, e se propagam com a velocidade do fluxo. Já os transientes são caracterizados como esforços de grande intensidade, que ocorre em um curto intervalo de tempo. Como exemplos de transientes cita-se o golpe de aríete, originados por uma variação brusca de pressão decorrente entre outras causas, da abertura ou fechamento de válvulas manuais, válvulas de

controle e de segurança, partida e parada de bombas. Esses esforços, quando se apresentam com grande intensidade causam desalinhamento, deformação e até o rompimento da tubulação.

#### **2.4.2 Tensões primárias, secundárias e relaxamento espontâneo**

A Norma ASME B31.3 (2008) classifica as tensões atuantes nas tubulações em dois grupos distintos, denominados tensões primárias e tensões secundárias. As tensões primárias são originadas por forças que incidem na tubulação, decorrentes entre outras do peso próprio e do fluido conduzido, cargas externas apoiadas e pressão interna. Essas cargas normalmente atuam durante toda a vida útil da tubulação. Já as tensões secundárias são decorrentes da temperatura, causando a expansão ou contração da tubulação. As restrições impostas á tubulação como os apoios, guias, batentes e ancoragens, limitam o seu movimento, originando tensões secundárias que podem atingir valores significativos, provocando a deformação e até o rompimento do tubo. Diferentemente das tensões primárias, as tensões secundárias tendem a diminuir com o tempo, devido ao relaxamento espontâneo da tubulação e, limitam-se a tensão de escoamento do material.

#### **2.4.3 Tensões admissíveis em tubulações**

Denominam-se tensões admissíveis, as máximas tensões consideradas no cálculo estrutural de uma tubulação. Todas as tensões atuantes na tubulação devem ser inferiores as tensões admissíveis.

A Tabela A1 da norma ASME B31.3 (2008) contém as tensões admissíveis básicas ( $S_h$ ) em função da temperatura, para vários tipos de materiais.

Em uma tubulação em operação ocorrem esforços circunferenciais e longitudinais, que atuam na direção radial e axial, respectivamente. O primeiro tipo é decorrente da pressão interna. No segundo tipo, além da contribuição da pressão, atuam o peso da tubulação e sobrecargas diversas. Esses esforços originam as tensões primárias na tubulação. A norma ASME B31.3 (2008) define que a tensão circunferencial e as tensões longitudinais devem ser inferiores a tensão admissível básica, a ser considerada quando os esforços incidentes na

tubulação são de tração, compressão ou flexão, como mostra as Equações 2.24 e 2.25.

$$\sigma_C \leq S_H \quad (2.24)$$

$$\sigma_L \leq S_H \quad (2.25)$$

Em que,

$\sigma_C$  é a tensão circunferencial

$\sigma_L$  é a tensão longitudinal

$S_H$  é a tensão admissível básica

No caso de esforços de torção ou cisalhamento puro a tensão admissível básica sofre uma redução de 20 %.

A tensão admissível para as tensões secundárias é definida conforme as Equações 2.24 e 2.25:

$$\sigma_s \leq S_a \quad (2.26)$$

$$S_a = f(1,25S_C + 0,25S_H) \quad (2.27)$$

Em que,

$S_a$  é a tensão admissível para as tensões secundárias

$\sigma_s$  é a tensão combinada decorrente das tensões secundárias

$S_C$  é a tensão admissível básica na menor temperatura de variação de ciclo

$S_H$  é a tensão admissível básica na maior temperatura de variação de ciclo

$f$  é o fator de correção para serviços cíclicos

O fator de correção “f” varia em função do número de ciclos. O gráfico da Figura 303.3.5 contido na Norma ASME B 31.3 (2008) informa que para um número de ciclos inferior a 7000, pode-se considerar o valor do fator de correção

igual a 1. Para um número de ciclos superior a 7000 o fator de correção é menor que 1.

## **2.5 Análise de tensões em tubulações**

### **2.5.1 Considerações iniciais**

O principal objetivo da análise de tensões em tubulação é a verificação da resistência estrutural da linha, quando submetida a esforços estáticos e dinâmicos, nas condições de operação, projeto, teste hidrostático e demais cenários que ocorram no processo. As principais grandezas detectadas na análise de tensão são as frequências naturais de vibração, as tensões atuantes, os esforços atuantes nas restrições, os deslocamentos e as forças e momentos atuantes em pontos diversos da tubulação, tais como pontos de mudança de direção, apoios, guias, batentes, ancoragens, entre outros.

Os esforços estáticos e dinâmicos que incidem nas tubulações devem ser calculados pelas equipes de projeto. A Norma ASME B31.3 (2008) conjuntamente com o critério de projeto do empreendimento recomenda que todas as linhas devem ser analisadas e, define critérios específicos de análise em função de suas principais características, como pressão, temperatura, diâmetro, grau de periculosidade do fluido conduzido, tubulações conectadas a equipamentos como bombas, compressores, válvulas de alívio e segurança, entre outros. Durante a fase de projeto, um documento denominado índice linhas de flexibilidade é elaborado, tomando-se como referência os fluxogramas de processo e às informações contidas na lista de linhas elaborada pela equipe de processo. Baseado nesses documentos os sistemas de tubulação são definidos e farão parte integrante de uma memória de cálculo. Cada sistema de tubulação contém requisitos específicos que definirá o tipo de análise a ser aplicada, que pode ser visual ou computacional. Vários programas de análise de tensão estão disponíveis no mercado, tais como, *CAESAR II*, *TRIFLEX*, *PIPESD*, *NIPIPE*, *ADLPIPE*, *ROHR2*, *PIPESTREES*, entre outros, sendo os dois primeiros os mais utilizados e difundidos na indústria nacional.

### **2.5.2 Análise estática**

A análise estática permite a avaliação estrutural da tubulação quando submetida a cargas primárias e secundárias, originadas pela pressão interna do fluido, peso da tubulação, dilatação térmica e forças estáticas que incidam na tubulação. As tubulações submetidas a carregamentos estáticos apresentam deslocamentos provenientes da expansão térmica dos tubos.

Nesse estudo, a Norma ASME B31.3 (2008) foi utilizada pelo programa como critério de cálculo estático.

### **2.5.3 Análise dinâmica**

A análise dinâmica permite a avaliação da tubulação quando submetida a cargas dinâmicas do tipo permanente ou transientes. Nos esforços dinâmicos ocorrem impactos cuja magnitude muda rapidamente com o tempo, não permitindo que o sistema de tubulação absorva as forças e momentos atuantes. A situação gera desequilíbrio e deslocamento da tubulação, percebido na forma de vibração. Normalmente a vibração está associada a uma variação abrupta da pressão na linha ou a variação da quantidade de movimento da massa fluida. Os locais de mudança de direção, por apresentarem uma quebra brusca da corrente fluida, são os mais solicitados.

Os programas de análise de tensões fornecem diferentes módulos para análise de sistemas de tubulação submetidos a carregamentos dinâmicos, que são: Análise modal, análise harmônica, análise espectral e resposta ao tempo. Cada módulo de análise tem um campo de aplicação específico, definido em função do tipo de solicitação, como segue:

#### **a) Análise modal (*Modal*)**

A análise modal determina as frequências naturais de vibração da tubulação. Em linhas que ocorrem vibrações induzidas, originadas por equipamentos rotativos como bombas, compressores, ou qualquer dispositivo que induza um movimento vibratório na linha, o conhecimento das frequências naturais é fundamental. Deve-se evitar que a frequência natural da linha coincida com a frequência induzida por qualquer fonte geradora. A coincidência das

frequências causa ressonância, fenômeno este caracterizado por elevada amplitude de vibração.

### **b) Análise harmônica (*Harmonic*)**

A análise harmônica é utilizada em sistemas de tubulação que apresentam cargas dinâmicas de natureza cíclica, como a pulsação de um fluido. Linhas interligadas a bombas ou compressores alternativos utilizam esse método de análise.

### **c) Espectros de resposta (*Spectrum*)**

O método espectro de resposta é utilizado para uma grande variedade de cargas dinâmicas permanentes e transientes, tipo impulso, tais como: cargas provenientes da abertura de válvulas de alívio, martelo hidráulico, escoamento bifásico tipo pistonado (*slug flow*), fechamento rápido de válvula, cargas decorrentes do vento e eventos sísmicos, como terremoto. Esse método de análise considera as forças ou os deslocamentos agindo em pontos específicos da tubulação (Pontos únicos). As ações dinâmicas incidentes nos pontos de mudança de direção, decorrentes do desbalanceamento hidráulico originado pela variação da quantidade de movimento, podem ser analisadas por este método. Os detalhes complementares referentes à metodologia de cálculo utilizada por esse método está descrita no item 2.5.4.

### **d) Histórico do tempo (*Time history*)**

Um método bastante preciso para determinação das respostas dinâmicas de um sistema de tubulação é o histórico do tempo. Neste método os perfis da força são analisados na linha do tempo, nos pontos onde ocorre a ação das forças dinâmicas, tais como pontos de mudança de direção, entre outros. Esses pontos são denominados “pontos únicos”.

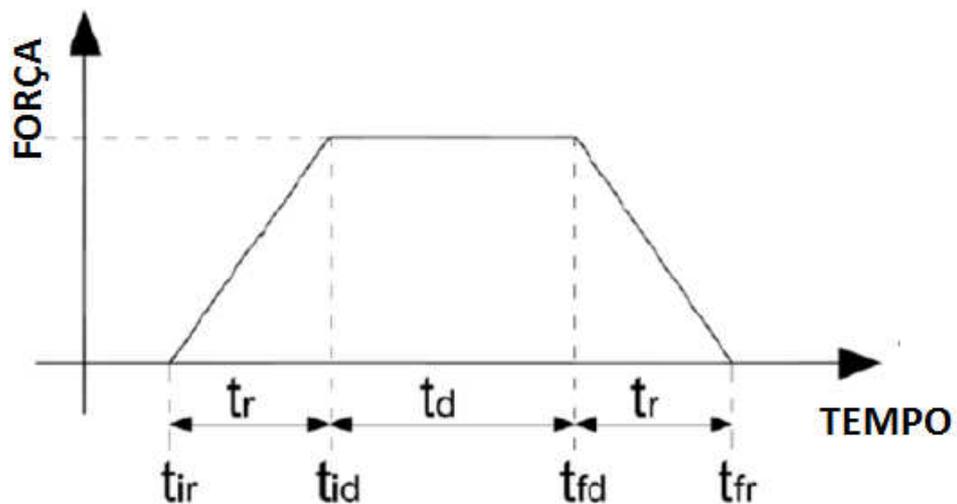
## **2.5.4 Descrição do método espectro de resposta**

No presente estudo, as solicitações mecânicas incidentes nos pontos de mudança de direção são compostas por forças intermitentes de curta duração, com frequência e amplitude diretamente proporcional a velocidade e a massa da corrente fluida. Esse tipo de solicitação é característico do regime pistonado.

Um dos métodos utilizados pelos programas de análise de tensões para avaliação dos efeitos dinâmicos na tubulação consiste na análise do espectro de resposta. O método permite que um evento transitório tipo impulso seja caracterizado por espectros de resposta no domínio do tempo ou da frequência. Cada modo de vibração do sistema de tubulação está relacionado a uma resposta do espectro, podendo ser utilizada em um grande número de aplicações. Como exemplo, as cargas provenientes de eventos sísmicos podem ser expressas na forma de espectros de deslocamento, velocidade ou aceleração, no domínio da frequência. As cargas que atuam em pontos específicos da tubulação, decorrentes de cargas transientes tipo impulso podem ser representadas através de espectros de força no domínio da frequência ou do tempo.

### **2.5.5 Estimativa dos tempos de rampa e de degrau**

O método de análise dinâmica baseado no espectro de resposta e histórico do tempo permite que seja selecionado o tipo de espectro mais adequado a solução de um determinado problema. Nos transientes dinâmicos ondas de choque percorrem a tubulação no sentido longitudinal, originando forças desequilibradas nos pontos de mudança de direção. As forças geradas pelos fluidos nesses pontos específicos crescem até um determinado valor, mantendo-se por um determinado tempo nesse patamar, e depois decrescem. O método “História do Tempo” permite que a forma e o tempo de atuação da força sejam representados no diagrama “Força em função do Tempo”, conforme apresentado na Figura 5.



**Figura 5: Espectro da força em função do tempo.**  
 Fonte: Análise de tensão estática e dinâmica de tubulação (Genpro)

O tempo de rampa ' $t_r$ ', apresentado na Equação 2.28 corresponde ao tempo gasto para a elevação da carga de zero ao valor de patamar e seu abaixamento novamente ao valor zero, que ocorre nas seções de entrada e saída da curva, respectivamente. O tempo de degrau ' $t_d$ ', apresentado na Equação 2.29, corresponde ao tempo de duração de passagem da carga pelo ponto médio da curva.

O tempo de rampa e de degrau são função das características geométricas da curva, como o raio de curvatura ' $R$ ', o ângulo de curvatura ' $\theta$ ', a velocidade do fluxo ' $V$ ' e o comprimento do pistão hidráulico ' $L$ '.

- Tempo de rampa:

$$t_r = \frac{R\theta}{V} \quad (2.28)$$

- Tempo de degrau:

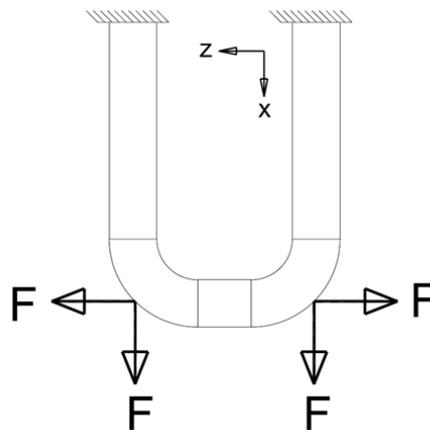
$$t_d = \frac{L - R\theta}{V} \quad (2.29)$$

Estudos mostram que as características geométricas do pistão de líquido e da bolha de gás, tal como o seu comprimento, varia ao longo da tubulação e não mantém constante ao longo do tempo. Barbosa Filho (2010) e Rodrigues (2011) elaboraram modelos numéricos e experimentais utilizados para a determinação das principais propriedades do escoamento, como a velocidade de propagação

das bolhas de gás, comprimentos das bolhas e do pistão de líquido, frequência de passagem e perda de pressão ao longo da tubulação. Estas propriedades sofrem ainda o efeito de vários fatores, como a geometria e orientação da tubulação segundo os planos horizontal, vertical ou inclinado, a transição entre planos, os efeitos gravitacionais, velocidade do fluxo, frações das fases presentes. A dificuldade presente na determinação do comprimento do pistão de líquido torna inviável a sua execução no contexto desse trabalho, sendo por essa razão arbitrado. Os valores calculados dos tempos de rampa e de degrau estão disponibilizados na Tabela 6.

### 2.5.6 Tempo de defasagem

Em um sistema de tubulação, o cenário mais conservativo a ser analisado seria considerar as cargas originadas pela variação da quantidade de movimento das fases atuando simultaneamente em todas as curvas. Em contrapartida, a análise da direção e do sentido das forças mostra que muitas se anulariam, melhorando a condição de equilíbrio do sistema, como exemplificado na Figura 6.



**Figura 6: Representação das forças originadas no escoamento bifásico.**

No modelo proposto foi considerado um tempo de defasagem para atuação das forças em cada curva, determinado pela razão entre a velocidade do escoamento e o comprimento de cada trecho da tubulação, como mostrado na Tabela 7. Essa condição aproxima o estado de desequilíbrio do sistema para uma condição real, que considera as forças atuando nas curvas em diferentes momentos.

## 2.6 Forças induzidas pelo escoamento bifásico

As forças induzidas na tubulação pela corrente fluida são determinadas considerando o princípio da variação da quantidade de movimento. Os locais de mudança de direção, por apresentarem uma quebra brusca da corrente fluida, são os mais solicitados, como apresentado na Figura 7.

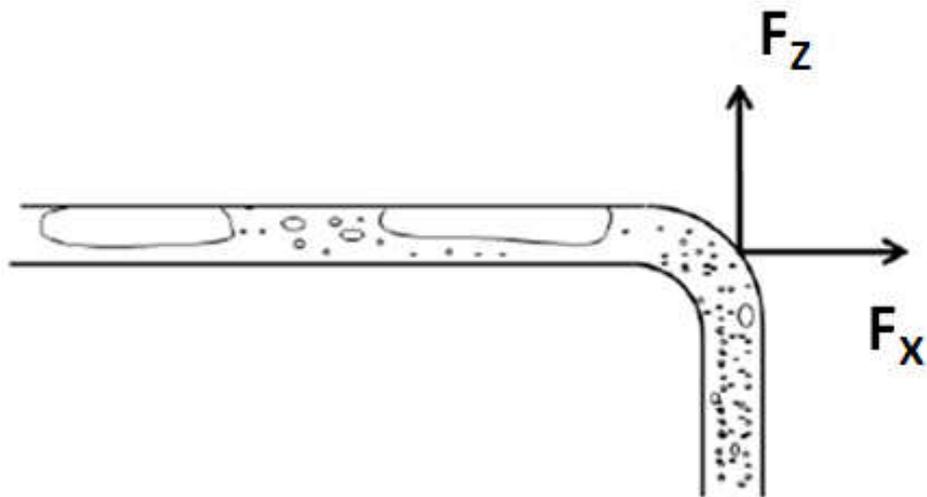


Figura 7: Representação das forças atuantes nas curvas.  
Fonte: Almeida (2012)

### 2.6.1 Equação da quantidade de movimento

Brunetti (2008) apresenta em seu livro a dedução das equações da quantidade de movimento para um tubo de corrente (Figura 8).

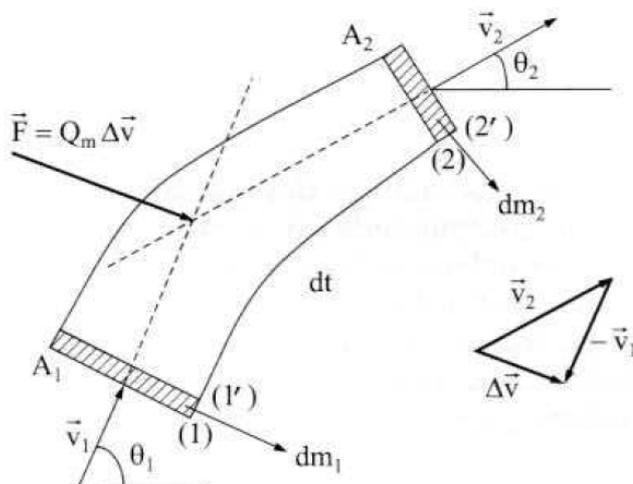


Figura 8: Tubo de corrente.  
Fonte: Brunetti (2008)

A Segunda Lei de Newton mostra a força resultante que age no fluido entre as seções 1 e 2 do tubo:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = \frac{dm_2 V_2}{dt} - \frac{dm_1 V_1}{dt} \quad (2.30)$$

Considerando o regime permanente, a massa de líquido que entra é igual à massa de líquido que sai:

$$\frac{dm_2 V_2}{dt} = \frac{dm_1 V_1}{dt} = \frac{dm}{dt} = Q_m \quad (2.31)$$

$$F = Q_m \cdot (V_2 - V_1) \quad (2.32)$$

Em que,

$\frac{dm_1 V_1}{dt}$  é a variação da quantidade de movimento na entrada

$\frac{dm_2 V_2}{dt}$  é a variação da quantidade de movimento na saída

F é a força atuante no fluido

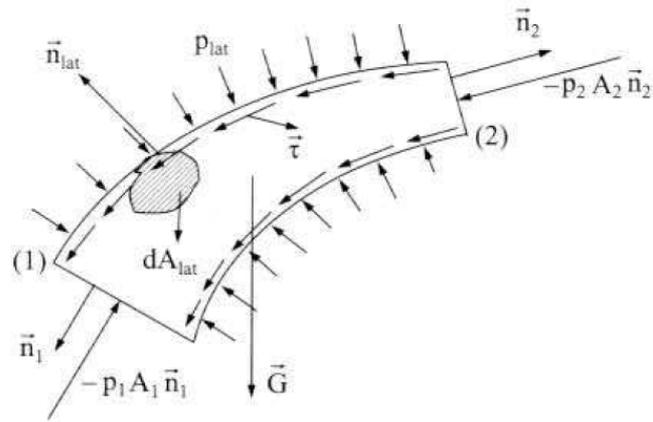
m é a massa do fluido

a é a aceleração do fluido

$Q_m$  é a vazão mássica

$V_1$  e  $V_2$  são as velocidades do fluido nas seções de entrada e saída

As forças atuantes que agem sobre um fluido são decorrentes das tensões normais devido à pressão interna, das forças transversais devido às tensões de cisalhamento e das tensões de campo devido ao efeito da gravidade. As forças estão representadas na Figura 9.



**Figura 9: Forças incidentes em um tubo de corrente.**

Fonte: Brunetti (2008)

$$F = F`s + (-P_1A_1n_1) + (P_2A_2n_2) + G \quad (2.33)$$

$$F`s = P_1A_1n_1 + P_2A_2n_2 - G + F \quad (2.34)$$

$$F`s = P_1A_1n_1 + P_2A_2n_2 + Q_m(V_2 - V_1) - G \quad (2.25)$$

$F`s$  representa a resultante da força que a superfície exerce sobre o fluido. Pelo princípio da ação e reação, a força que o fluido exerce sobre a superfície possui o mesmo módulo e direção contrária ( $F`s = -F_s$ ).

$$F_s = -[P_1A_1n_1 + P_2A_2n_2 + Q_m(V_2 + V_1)] + G \quad (2.36)$$

Em que,

$F$  é a força resultante que age sobre o fluido

$F`s$  é a força devido às tensões longitudinais

$F_s$  é a força na superfície devido às tensões longitudinais

$G$  é a força da gravidade

$P_1$  e  $P_2$  são as pressões nas seções de entrada e saída

$A_1$  e  $A_2$  são as áreas das seções de entrada e saída

$n_1$  e  $n_2$  são os versores das seções de entrada e saída

A equação geral da força será agora deduzida considerando a passagem por uma curva de 90°. Levando-se em conta que as pressões nas seções de

entrada e saída são muito próximas, que as áreas das seções de entrada e saída são iguais e que o peso do fluido contido no tubo é desprezível, a equação se torna:

$$F_{sx} = -Q_m(V_1 - V_2) = \rho VA(V_1 - V_2) = \rho VA(V_1 - V_2 \cos 90) = \rho V^2 A(1 - 0)$$

$$F_{sx} = \rho V^2 A \quad (2.37)$$

$$F_{sy} = Q_m(V_1 - V_2) = \rho VA(V_1 - V_2) = \rho VA(0 - V_2 \sin 90) = \rho V^2 A(0 - 1)$$

$$F_{sy} = -\rho V^2 A \quad (2.38)$$

Nota: O sinal negativo da equação significa que o sentido da força é na direção oposta ao sentido do eixo Y.

Em que,

$F_{sx}$  é a força atuante na superfície segundo a direção 'x'

$F_{sy}$  é a força atuante na superfície segundo a direção 'y'

$\rho$  é a densidade do fluido

$V$  é a velocidade do fluxo

Adaptando as Equações 2.37 e 2.38 para o fluxo bifásico, tem-se as Equações 2.39 e 2.40.

$$F_{sx} = -Q_m(V_1 - V_2) = \rho_m V_m A(V_1 - V_2) = \rho_m V_m A(V_1 - V_2 \cos 90) = \rho_m V_m^2 A(1 - 0)$$

$$F_{sx} = \rho_m V_m^2 A \quad (2.39)$$

$$F_{sy} = Q_m(V_1 - V_2) = \rho_m V_m A(V_1 - V_2) = \rho_m V_m A(0 - V_2 \sin 90) = \rho_m V_m^2 A(0 - 1)$$

$$F_{sy} = -\rho_m V_m^2 A \quad (2.40)$$

Em que,

$Q_m$  é a vazão mássica

$\rho_m$  é a densidade média da mistura bifásica

$V_m$  é a velocidade média do fluxo bifásico

Para determinação das forças dinâmicas apresentadas pelas Equações 2.39 e 2.40 utilizou-se um método de cálculo simplificado, que considera a mistura homogênea das duas fases presentes.

## **2.7 Trabalhos referentes à vibração induzida em tubulações**

Alguns trabalhos referentes ao escoamento bifásico foram efetuados por vários autores, com objetivo de se compreender melhor o mecanismo de vibração em sistemas de tubulação.

Riverin, et.al. (2006) propuseram um método que avalia o aumento da magnitude da força resultante nas curvas em função do aumento da velocidade de escoamento das fases, em diferentes frações, originado pela variação da quantidade de movimento do escoamento bifásico do tipo bolhas, transitório e golfadas. O resultado da análise possibilitou a obtenção de fórmulas adimensionais para o cálculo da força induzida em função da variação da velocidade da mistura. Utilizou-se no experimento um fluxo composto por ar e água, com uma configuração de tubulação em “U”, montado na posição vertical.

Riverin e Pettigrew (2007) efetuaram um estudo dos modos de vibração de uma tubulação para várias condições de escoamento, caracterizados por diferentes velocidades e frações de fases. Os resultados mostram que a origem da vibração está relacionada ao fenômeno de ressonância entre as variações periódicas da quantidade de movimento decorrentes da variação das velocidades e os primeiros modos de vibração do sistema. Utilizou-se no experimento ar e água, com uma configuração de tubulação em “U”, montado na posição vertical.

Heloui (2008) em sua análise experimental referente à vibração induzida pelo escoamento bifásico mostrou a relação entre a velocidade superficial da mistura e a intensidade do movimento de oscilação. O fenômeno da ressonância entre os esforços induzidos pela quantidade de movimento e os primeiros modos vibração natural da tubulação foram observados. Nesse experimento foi também utilizado um fluxo de ar e água, com uma configuração de tubulação em “U”, agora montado na posição horizontal.

Raeder (2012) efetuou um estudo comparativo da variação da força dinâmica gerada pelo escoamento bifásico em função da variação da velocidade da mistura. A análise comparativa foi efetuada em duas etapas. Na primeira etapa foram comparados os resultados da força média quadrática ( $F_{RMS}$ ) obtidos de forma experimental no modelo físico com os resultados obtidos nas equações dimensionais desenvolvidas nos ensaios experimentais de Riverin et.al. (2006). Em uma segunda etapa as forças dinâmicas obtidas no experimento físico, em uma amostra de 100 s, foram comparadas às forças calculadas através das equações da quantidade de movimento. Os resultados do estudo mostraram uma forte relação entre a magnitude da força dinâmica originada pelo escoamento bifásico e a velocidade de escoamento da mistura de fases. Verificou-se também que as vibrações de maior intensidade ocorreram nas frequências equivalentes aos primeiros modos de vibração, devido à ressonância. Foi utilizada no experimento físico uma mistura de ar e água, em uma tubulação com configuração em U montada na posição vertical.

Os últimos trabalhos mencionados nos parágrafos anteriores constituíram uma referência especial na elaboração desse estudo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Análise computacional

##### 3.1.1 Modelagem numérica

A análise numérica dos três sistemas de tubulação foi efetuada pelo programa *CAESAR II*, *VERSÃO 5.10*, desenvolvido pela empresa *COADE*, muito utilizado na indústria para o projeto mecânico e análise de tensões em tubulação. O usuário do programa cria um modelo do sistema, onde cada ponto relevante da tubulação é identificado por um nó. Nas etapas de configuração e modelagem, todas as características da tubulação são definidas, tais como sistema de unidades utilizado, diâmetro, espessura e material da tubulação, pontos de apoio e de restrição de movimento, assim como os carregamentos impostos ao sistema. A partir dessas entradas, o *CAESAR II* produz resultados para cada nó criado pelo programa, sob a forma de frequências, tensões, deslocamentos, momentos e forças atuantes. O *CAESAR II* compara esses resultados com os limites especificados pelo código ou padrões de projetos reconhecidos.

O *CAESAR II* é utilizado tanto para o projeto mecânico de novos sistemas de tubulação como para a adequação de tubulações existentes. Os sistemas de tubulação quando aquecidos apresentam um problema único para o engenheiro mecânico, originado pela temperatura. Estas estruturas irregulares experimentam uma grande tensão térmica, originada pela expansão térmica, que deve ser absorvida pela tubulação, suportes e equipamentos interligados. Os sistemas de tubulação devem também apresentar resistência estrutural suficiente para suportar seu peso próprio e demais cargas impostas, e ter flexibilidade suficiente para absorver a expansão térmica. Os resultados da análise são apresentados pelo programa na forma de relatórios, específico para tipo de solicitação. Para auxiliar na análise, o *CAESAR II* incorpora muitas das limitações sobre os sistemas de tubulação e os equipamentos interligados. Esses limites são normalmente especificados por órgãos de engenharia, tais como os comitês *ASME B31*, a Seção VIII da *ASME*, o Conselho de Pesquisa de Soldagem e por fabricantes de equipamentos (*API*, *NEMA*, *EJMA*), entre outros.

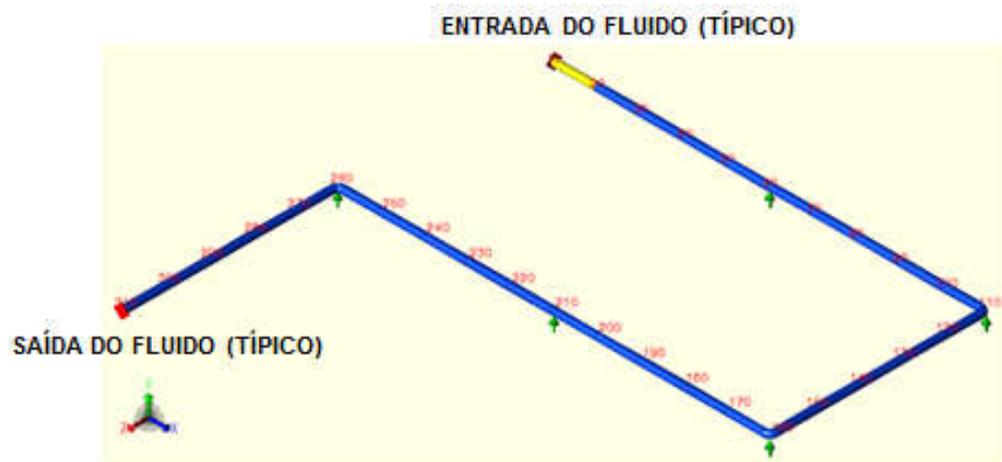
O *CAESAR II* não se limita à análise térmica de sistemas de tubulação. O programa também possui a capacidade de modelar e analisar toda a gama de cargas estáticas e dinâmicas impostas ao sistema.

### **3.1.2 Modelos analisados**

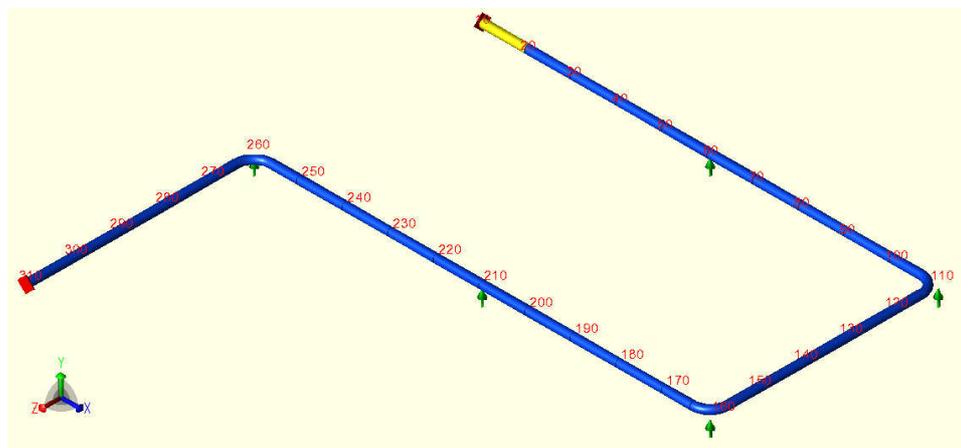
Três arranjos de tubulação com a mesma configuração, dispostos na posição horizontal foram avaliados. Os arranjos utilizam separadamente curvas de raio 1D; 3D e 5D. As tubulações possuem diâmetro nominal de 1" (25,4 mm) e o material utilizado foi o aço carbono API 5L Gr. B, amplamente utilizado na indústria do petróleo gás. As análises foram efetuadas considerando os cenários apresentados no item 3.1.6, que considera o padrão de escoamento pistonado. Os demais padrões não foram analisados, por não apresentarem intermitência entre as fases presentes.

Nas extremidades da tubulação estão posicionados os pontos fixos, denominados ancoragens, que não permitem nenhum tipo de movimento. Ao longo do comprimento da tubulação estão previstos suportes de apoio e guias laterais, convenientemente posicionados, de forma a apoiar e restringir adequadamente o movimento da tubulação, tornando-o flexível o suficiente para absorver a expansão térmica da tubulação.

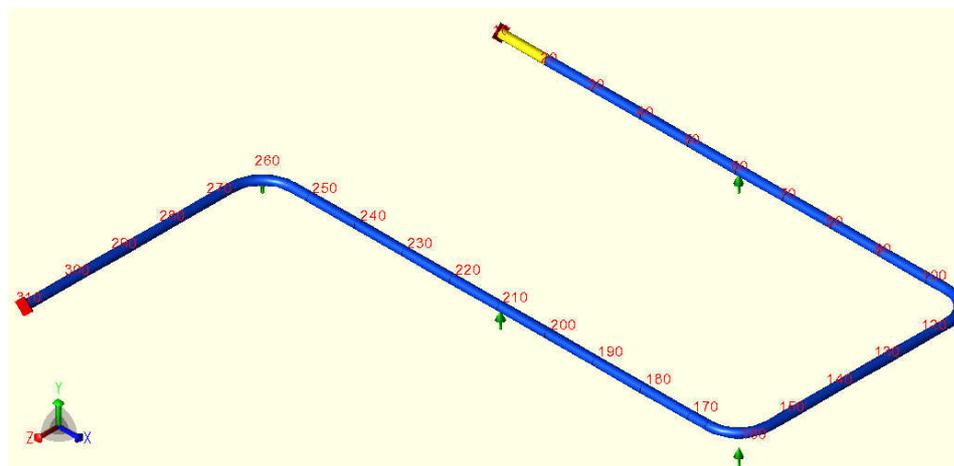
Os modelos analisados estão apresentados na Figura 10. A geometria, dimensões e demais características da tubulação estão representadas na Figura 12.



(a)



(b)



(c)

**Figura 10: Trecho de tubulação analisado.**  
 (a):  $R = 1D$ , (b):  $R = 3D$ , (c):  $R = 5D$

### 3.1.3 Propriedades do fluido conduzido e da tubulação

#### a) Propriedades do fluido conduzido

Na Tabela 1 constam as propriedades dos fluidos conduzidos.

Tabela 1: Propriedades dos fluidos.

FLUIDO	TEMPERATURA [°C]	PRESSÃO [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	DENSIDADE [Kg/m <sup>3</sup> ]
ÁGUA	60	1,033	1000
AR	60	1,033	1,06

#### b) Características da tubulação

Na Tabela 2 estão as principais características da tubulação.

Tabela 2: Características da tubulação.

MATERIAL	SCH	DN [in]	ESP [mm]	Di [mm]
Aço carbono API 5L Grau B	80	1	4,55	24,3

#### c) Tensões admissíveis da tubulação

Estão apresentadas na Tabela 3 as tensões admissíveis na tubulação, definidas pelo código de projeto.

Tabela 3: Tensões admissíveis na tubulação.

MATERIAL	T [°C]	S <sub>C</sub> [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>H</sub> [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>A</sub> [Kgf/cm <sup>2</sup> ]
API 5L Grau B	60	1406,14	1406,14	2019,21

### 3.1.4 Casos avaliados

Os casos considerados na análise de tensões das tubulações pelo software CAESAR II foram os seguintes:

CASO 1: (OPE) =  $W + P_1 + T_1$  (Condição de Operação)

CASO 2: (SUS) =  $W + P_1$  (Sustentação)

CASO 5: (EXP) =  $T_1$  (Expansão)

Em que,

'W' é a soma do peso do fluido com o peso da tubulação

'P<sub>1</sub>' é pressão fluido

'T<sub>1</sub>' é a temperatura do fluido

No caso de operação os cálculos consideraram os esforços primários e secundários, que são a pressão, o peso da tubulação acrescido do fluido conduzido e os efeitos da temperatura. No caso de sustentação não foram considerados os efeitos da temperatura. Esse caso é utilizado para determinação das cargas nos suportes, evitando-se dessa forma a ocorrência de perda de apoio devido à expansão térmica da tubulação, que pode causar um deslocamento do tubo na direção vertical ascendente. O caso expansão considera apenas o efeito da temperatura, sendo utilizado para determinação dos deslocamentos máximos da tubulação.

### 3.1.5 Frequência natural da tubulação

As frequências naturais da tubulação, também denominadas frequências modais, foram extraídas dos relatórios de saída obtidos no módulo dinâmico modal.

### 3.1.6 Cenários avaliados

Para análise dinâmica foram propostos inicialmente 75 diferentes cenários, compostos por 3 diferentes configurações de tubulação, 5 velocidades de escoamento (2m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s e 10 m/s) e, 5 diferentes frações de ar (10%, 25%, 50%, 75% e 90%). Os cenários estão apresentados na Tabela 4.

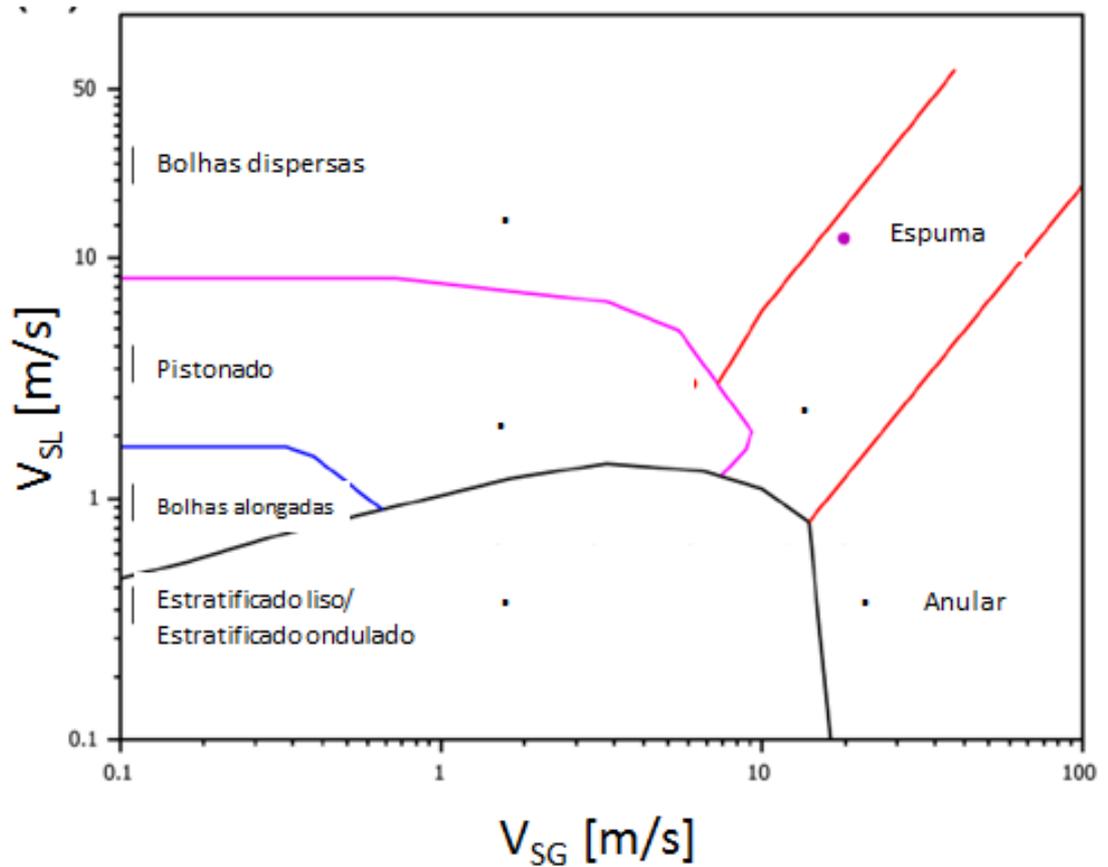
Dos 75 cenários propostos, 45 apresentam o escoamento padrão pistonado, 27 cenários apresentam o padrão estratificado e 3 cenários apresentam o padrão bolhas alongadas (Tampão). Os padrões de escoamento estão identificados na última coluna da Tabela 4.

O método numérico utilizado nessa análise é o espectro de resposta, que analisa cargas pontuais de natureza dinâmicas, através do método que considera o espectro da força em função do tempo. O escoamento pistonado é caracterizado como intermitente devido à descontinuidade da bolha de gás. A variação da quantidade de movimento das fases faz variar a magnitude da força pontual que atua nos pontos de mudança de direção, como mostra o gráfico da história do tempo apresentado na Figura 5. Já o escoamento no padrão estratificado, ambas as fases apresentam continuidade, não sendo possível sua representação na forma temporal. O conceito utilizado no método história do tempo é empregado somente para cargas pontuais que sofrem variação com o tempo, como ocorre no padrão pistonado. No presente estudo somente os escoamentos que apresentam o padrão pistonado foram analisados. Faz-se uma ressalva ao cenário 2.1, relacionado na Tabela 4, que se apresenta no padrão bolhas alongadas. Considerando que nesse padrão a bolha alongada de ar apresenta intermitência, a mesma metodologia de cálculo foi aplicada a este cenário.

A análise dos dados da Tabela 4 permite observar que à medida que se aumenta a fração de gás na mistura, o padrão de escoamento tende a se modificar de pistonado para estratificado.

Quanto ao critério de seleção das velocidades de escoamento da mistura líquido e gás, foram tomadas como referência as velocidades econômicas normalmente praticadas em tubulações. Telles (2008) considera em seu livro velocidades usuais de até 8 m/s para água de caldeira, 2,5 m/s para hidrocarbonetos líquidos e 25 m/s para os gases.

A caracterização dos padrões de escoamento em função das velocidades superficiais e das frações de líquido e gás foi efetuada considerando o mapa de escoamento de Petalas & Aziz (1998), apresentado na Figura 11.



**Figura 11: Mapa de escoamentos - Petalas & Azis.**  
 Fonte: Comparison of Two-phase Pipe Flow (Shuard, Adrian M, 2016)

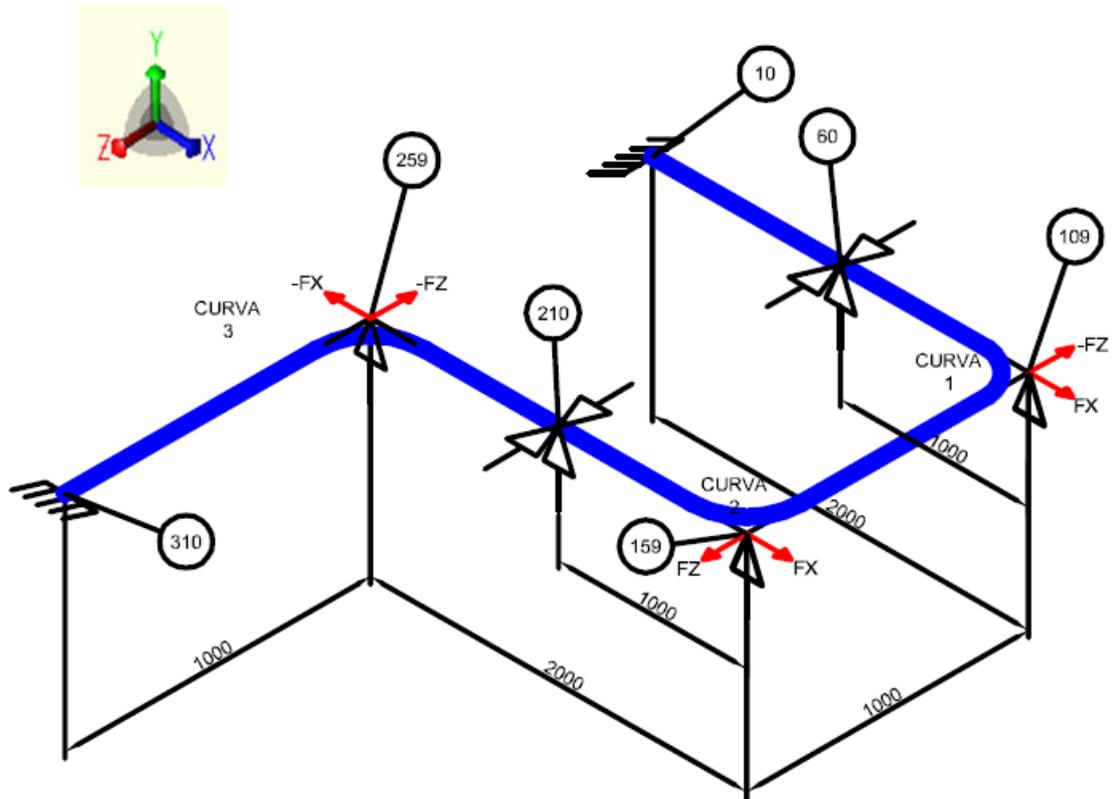
A Tabela 4 apresenta os cenários avaliados e os padrões de escoamento para os três conjuntos de tubulação que utilizam curvas com raios 1D, 3D e 5D.

Tabela 4: Cenários avaliados para os três arranjos de tubulação.

CENÁRIOS	VELOC. SUPERF. DA MISTURA [m/s]	VAZÃO [m <sup>3</sup> /h]	FRAÇÃO VOLUMÉT. %		VAZÃO [m <sup>3</sup> /h]		VELOC. SUPERF. [m/s]		PADRÃO
	V <sub>s</sub>	Q	C <sub>G</sub> =β	C <sub>L</sub> =λ	Q <sub>G</sub>	Q <sub>L</sub>	V <sub>SG</sub>	V <sub>SL</sub>	
1.1	2	3,34	10	90	0,33	3,0	0,2	1,8	PISTONADO
1.2	4	6,68			0,66	6,02	0,4	3,6	PISTONADO
1.3	6	10			1	9,0	0,6	5,4	PISTONADO
1.4	8	13,36			1,34	12,02	0,8	7,2	PISTONADO
1.5	10	16,70			1,67	15,03	1,0	9,0	PISTONADO
2.1	2	3,34	25	75	0,83	2,51	0,5	1,5	BOLHA ALONGADA
2.2	4	6,68			1,67	5,01	1,0	3	PISTONADO
2.3	6	10			2,5	7,5	1,5	4,5	PISTONADO
2.4	8	13,36			3,34	10,02	2,0	6	PISTONADO
2.5	10	16,70			4,17	12,53	2,5	7,5	PISTONADO
3.1	2	3,34	50	50	1,67	1,67	1,0	1,0	ESTRATIFIC
3.2	4	6,68			3,34	3,34	2,0	2,0	PISTONADO
3.3	6	10			5,0	5,0	3,0	3,0	PISTONADO
3.4	8	13,36			6,68	6,68	4,0	4,0	PISTONADO
3.5	10	16,70			8,35	8,335	5,0	5,0	PISTONADO
4.1	2	3,34	75	25	2,5	0,84	1,5	0,5	ESTRATIFIC
4.2	4	6,68			5,0	1,68	3,0	1,0	ESTRATIFIC
4.3	6	10			7,5	2,5	4,5	1,5	ESTRATIFIC
4.4	8	13,36			10,0	3,36	6,0	2,0	PISTONADO
4.5	10	16,70			12,52	4,18	7,5	2,5	PISTONADO
5.1	2	3,34	90	10	3,0	0,34	1,8	0,2	ESTRATIFIC
5.2	4	6,68			6,0	0,68	3,6	0,4	ESTRATIFIC
5.3	6	10			9,0	1,0	5,4	0,6	ESTRATIFIC
5.4	8	13,36			12,0	1,36	7,2	0,8	ESTRATIFIC
5.5	10	16,70			15,0	1,70	9,0	1,0	ESTRATIFIC

### 3.1.7 Cálculo da força induzida

No presente estudo, as forças incidentes nas curvas foram determinadas através das Equações 2.39 e 2.40, considerando os cenários descritos no item 3.1.6. O valor da força foi decomposto no plano horizontal, nas direções longitudinal e transversal à seção da tubulação, conforme apresentado na Figura 12. O sistema de coordenadas ortogonais considerado para a representação das forças contidas na Tabela 5 é o mesmo adotado na modelagem no programa CAESAR II.



Nota: Dimensões em milímetros.

Figura 12: Forças induzidas na tubulação.

Tabela 5: Forças induzidas na tubulação.

CENÁRIOS	VELOCIDADE SUPERFICIAL MÉDIA [m/s]	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE GÁS %	DENSIDADE MÉDIA [Kg/m <sup>3</sup> ]	FORÇA NA CURVA [N]	
	V <sub>s</sub>	C <sub>G</sub> =β	ρ <sub>m</sub>	F <sub>sx</sub>	F <sub>sz</sub>
1.1	2	10	900,12	1,67	1,67
1.2	4		900,12	6,68	6,68
1.3	6		900,12	15,03	15,03
1.4	8		900,12	26,73	26,73
1.5	10		900,12	41,76	41,76
2.1	2	25	750,30	1,39	1,39
2.2	4		750,30	5,57	5,57
2.3	6		750,30	12,53	12,53
2.4	8		750,30	22,28	22,28
2.5	10		750,30	34,81	34,81
3.1	2	50	500,60	0,93	0,93
3.2	4		500,60	3,72	3,72
3.3	6		500,60	8,36	8,36
3.4	8		500,60	14,86	14,86
3.5	10		500,60	23,23	23,23
4.1	2	75	250,90	0,46	0,46
4.2	4		250,90	-1,86	-1,86
4.3	6		250,90	4,19	4,19
4.4	8		250,90	-7,45	-7,45
4.5	10		250,90	-11,64	-11,64
5.1	2	90	101,0	0,19	0,19
5.2	4		101,0	0,75	0,75
5.3	6		101,0	1,69	1,69
5.4	8		101,0	3,0	3,0
5.5	10		101,0	4,69	4,69

### 3.1.8 Tempos de rampa e de degrau ( $t_r$ e $t_d$ )

Os tempos de rampa e de degrau descritos no item 2.5.5 são inversamente proporcionais à velocidade superficial média da mistura. Foram determinados os tempos de rampa e degrau para as 5 diferentes velocidades superficiais médias citadas. Para a determinação tempo de degrau considera-se além da velocidade média do fluxo, o comprimento do pistão de líquido. Sabe-se que para uma mesma velocidade superficial média, o fluxo pode ocorrer em várias frações de líquido e gás. Isso implica em um tempo de degrau específico para cada fração de fase. Em trabalhos experimentais, muitas técnicas são utilizadas para determinação do comprimento do pistão de líquido, citando como exemplo as técnicas de ultrassom, *wire-mach* e filmagem de alta velocidade. Os comprimentos do pistão de líquido obtidos são tratados estatisticamente, pelo fato de não serem constantes ao longo do tempo e do comprimento da tubulação. A fluidodinâmica computacional é também utilizada para determinação das características geométricas do pistão de líquido e bolha de gás. Considerando a dificuldade apresentada na determinação do comprimento do pistão, foi utilizado na determinação dos tempos de degrau, um comprimento de pistão de líquido equivalente a  $10D$  (10 vezes o diâmetro interno da tubulação). Dessa forma, curvas de diferentes raios responderão dinamicamente a uma porção de fluido de mesmo volume, porém com diferentes velocidades e densidades.

Os tempos de rampa e de degrau foram determinados através das Equações 2.28 e 2.29 e estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6: Tempo de rampa e de degrau em milésimos de segundo (ms).**

RAIO	V [m/s]	t <sub>r</sub> [ms]	t <sub>d</sub> [ms]
R = 1D	2	19	107
	4	9,9	53,5
	6	6,6	35,6
	8	4,9	26,7
	10	3,9	21,4
R = 3D	2	59,8	67,1
	4	29,9	33,5
	6	19,9	22,3
	8	14,9	16,7
	10	11,9	13,4
R = 5D	2	99,7	27,5
	4	49,8	13,6
	6	33,2	9,0
	8	24,9	6,8
	10	19,9	5,4

### 3.1.9 Tempo de defasagem

Podem ser observados na Tabela 7 os valores referentes à defasagem de tempo presente no deslocamento do pistão de líquido entre as três curvas, determinados em função da razão entre a velocidade de escoamento e o comprimento entre as curvas. A curva '1' foi tomada como referência para determinação dos tempos.

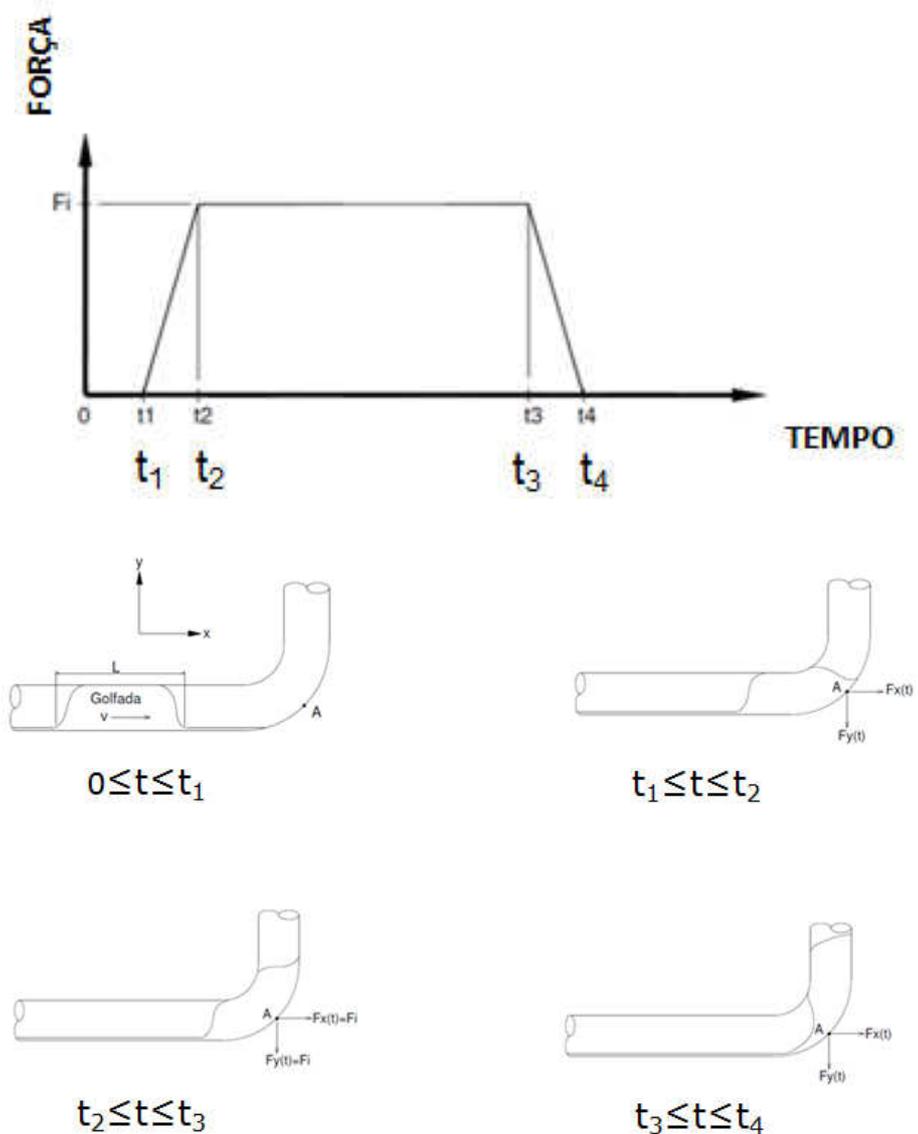
**Tabela 7: Tempo de defasagem em milésimos de segundo [ms].**

VELOCIDADE	V=2m/s	V=4m/s	V=6m/s	V=8m/s	V=10m/s
LOCAL	TEMPO DE DEFASAGEM [ms]				
CURVA 1	0	0	0	0	0
CURVA 2	500	250	160	125	100
CURVA 3	1500	750	500	375	300

### 3.1.10 Determinação dos tempos de passagem ( $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ )

Os tempos de passagem correspondem à soma dos tempos de rampa e degrau com os tempos de defasagem. Esses tempos mostram os momentos de passagem do pistão de líquido ao longo da curva.

Na Figura 13 consta a representação do perfil da força em função do tempo, que incide no trecho reto a montante da curva ( $0 \leq t \leq t_1$ ), na seção de entrada da curva ( $t_1 \leq t \leq t_2$ ), no ponto médio da curva ( $t_2 \leq t \leq t_3$ ) e na seção de saída ( $t_3 \leq t \leq t_4$ ).



**Figura 13: História do tempo (*Time History*).**

Fonte: Análise de tensão estática e dinâmica de tubulação (Genpro)

Constam na Tabela 8 os tempos de deslocamento do pistão de líquido em função das velocidades superficiais médias da mistura, para as três curvas, com diferentes raios de curvatura.

**Tabela 8: Tempos de passagem do pistão de líquido.**

RAIO	VELOCIDADE	LOCAL	t1 [ms]	t2 [ms]	t3 [ms]	t4 [ms]	
R = 1D	V = 2 m/s	CURVA 1	0	19	126	145	
		CURVA 2	500	519	626	645	
		CURVA 3	1500	1519	1626	1645	
	V = 4 m/s	CURVA 1	0	9,9	63,4	73,3	
		CURVA 2	250	259,9	313,4	323,3	
		CURVA 3	750	759,9	813,4	823,3	
	V = 6 m/s	CURVA 1	0	6,6	42,2	48,8	
		CURVA 2	160	166,6	202,2	208,8	
		CURVA 3	500	506,6	542,2	548,8	
	V = 8 m/s	CURVA 1	0	4,9	31,6	36,5	
		CURVA 2	125	129,9	156,6	161,5	
		CURVA 3	375	379,9	406,6	411,5	
	V = 10 m/s	CURVA 1	0	3,9	25,3	29,2	
		CURVA 2	100	103,9	125,3	129,2	
		CURVA 3	300	303,9	325,3	329,2	
	R = 3D	V = 2 m/s	CURVA 1	0	59,8	126,9	186,7
			CURVA 2	500	559,8	626,9	686,7
			CURVA 3	1500	1559,8	1626,9	1686,7
V = 4 m/s		CURVA 1	0	29,9	63,4	93,33	
		CURVA 2	250	279,9	313,4	343,3	
		CURVA 3	750	779,9	813,4	843,3	
V = 6 m/s		CURVA 1	0	19,9	42,2	62,1	
		CURVA 2	160	179,9	202,2	222,1	
		CURVA 3	500	519,9	542,2	562,1	
V = 8 m/s		CURVA 1	0	14,9	31,6	46,5	
		CURVA 2	125	139,9	156,6	171,5	
		CURVA 3	375	389,9	406,6	421,5	
V = 10 m/s		CURVA 1	0	11,9	25,3	37,2	
		CURVA 2	100	111,9	125,3	137,2	
		CURVA 3	300	311,9	325,3	337,2	

**Continua**

**Tabela 8: Tempos de passagem do pistão de líquido (Continuação).**

<b>RAIO</b>	<b>VELOCIDADE</b>	<b>LOCAL</b>	<b>t<sub>1</sub> [ms]</b>	<b>t<sub>2</sub> [ms]</b>	<b>t<sub>3</sub> [ms]</b>	<b>t<sub>4</sub> [ms]</b>
<b>R = 5D</b>	<b>V = 2 m/s</b>	<b>CURVA 1</b>	0	99,7	127,2	226,9
		<b>CURVA 2</b>	500	599,7	627,2	726,9
		<b>CURVA 3</b>	1500	1599,7	1627,2	1726,9
	<b>V = 4 m/s</b>	<b>CURVA 1</b>	0	49,8	63,4	113,2
		<b>CURVA 2</b>	250	299,8	313,4	363,2
		<b>CURVA 3</b>	750	799,8	813,4	863,2
	<b>V = 6 m/s</b>	<b>CURVA 1</b>	0	33,2	42,2	75,4
		<b>CURVA 2</b>	160	193,2	202,2	235,4
		<b>CURVA 3</b>	500	533,2	542,2	575,4
	<b>V = 8 m/s</b>	<b>CURVA 1</b>	0	24,9	31,7	56,6
		<b>CURVA 2</b>	125	149,9	156,7	181,6
		<b>CURVA 3</b>	375	399,9	406,7	431,6
	<b>V = 10 m/s</b>	<b>CURVA 1</b>	0	19,9	25,3	45,2
		<b>CURVA 2</b>	100	119,9	125,3	145,2
		<b>CURVA 3</b>	300	319,9	325,3	345,2

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As considerações referentes aos resultados encontrados na análise computacional tiveram como objetivo avaliar o comportamento estático e dinâmico de três conjuntos de tubulação dotados de mesmo arranjo, porém, utilizando separadamente curvas com três diferentes raios de curvatura. Os parâmetros avaliados foram às tensões atuantes na tubulação, os esforços atuantes nas restrições, os deslocamentos e às forças atuantes nos pontos médios das curvas.

### **4.1 Resposta estática da tubulação**

As análises estáticas efetuadas corresponderam a três arranjos de tubulação equivalentes, que utilizaram curvas de raio 1D, 3D e 5D. Os casos analisados foram operação, sustentação e expansão, que consideraram os esforços provenientes do efeito da pressão, temperatura e peso da tubulação, acrescido do fluido conduzido. Nenhuma força adicional foi considerada na análise estática.

A análise estática não constituiu o principal objetivo desse estudo, no entanto, a análise das tensões atuantes, deslocamentos e os esforços gerados nas curvas e restrições permitiu conhecer o nível de solicitação da tubulação.

Os valores dos percentuais médios indicados com sinal negativo, nas Tabelas 9, 10, 11 e 12, significa que ocorreu uma diminuição dos valores das propriedades analisadas e, o sinal positivo indica um aumento do valor das propriedades, ambos em função do aumento do raio da curva.

#### **4.1.1 Tensões atuantes na tubulação**

Estão apresentados na Tabela 9 os valores das tensões atuantes a frio no ponto médio das curvas e, a máxima tensão atuante em um ponto genérico da tubulação, para os três casos de carga considerados, que são a operação, sustentação e expansão. A última coluna da tabela mostra o percentual de redução médio das tensões atuantes nas curvas de raio 3D e 5D, com referência as curvas de raio 1D. Considerando que a máxima tensão atuante na tubulação ocorre em diferentes nós, o valor médio de redução das tensões foi determinado

tomando-se como referência somente os valores das tensões atuantes nas curvas.

**Tabela 9: Tensões atuantes na tubulação.**

CASOS DE CARGA	NÓ	109	159	259	MÁX / NÓ	MÉDIA %
	RAIO	TENSÃO ATUANTE [Kpa]				
<b>CASO 1: OPERAÇÃO (OPE)</b>	R = 1D	1496,9	801,9	5580,2	5718,4 / 259	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	1144,8	841,4	4557,4	4707,9 / 259	-12,33
	%	-24	+5	-18	-18	
	R = 5D	1069,2	1017,8	4396,2	4396,2 / 259	-7,33
	%	-28	+27	-21	-23	
<b>CASO 2: SUSTENTAÇÃO (SUS)</b>	R = 1D	300,3	268	438,8	1720,7 / 210	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	302,4	122,8	389,6	1579,9 / 210	-21
	%	+0,7	-54	-11	-8	
	R = 5D	306,9	235,6	359,3	1499,7 / 60	-9,2
	%	+2,2	-12	-18	-13	
<b>CASO 3: TÉRMICA (EXP)</b>	R = 1D	1423,3	676,6	5598,2	5598,2 / 259	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	1064,2	742,4	4588,5	4588,5 / 259	-11
	%	-25	+10	-18	-18	
	R = 5D	982,2	914,1	4427,2	4427,2 / 259	-5,7
	%	-31	+35	-21	-21	

Para os casos operação e expansão, a tensão admissível a frio calculada pelo programa *Caesar II*, em conformidade com a Norma ASME B31.3, foi de 206.842 Kpa. Para o caso sustentação tem-se uma tensão admissível a frio de 137.895,1 Kpa. Para os três casos considerados, o estudo comparativo das tensões atuantes com as tensões admissíveis mostrou um baixo nível de solicitação da tubulação, equivalendo a 2,8%, 1,2% e 2,7% da tensão admissível, respectivamente. Esse comportamento se deve aos baixos valores da pressão e temperatura utilizadas na análise, minimizando, desta forma, a influência dessas propriedades no comportamento estático da tubulação. Para maiores pressões e temperaturas, as tensões normalmente podem atingir valores significativos.

Os baixos valores das tensões atuantes no caso sustentação, comparativamente aos casos operação e expansão, mostrou a forte influência da temperatura na tubulação. Quanto maior a temperatura, maior a expansão térmica e conseqüentemente maior o nível de tensão na tubulação.

A análise das tensões atuantes permitiu detectar a tendência de diminuição de suas magnitudes com o aumento do raio da curva. Para os casos operação, sustentação e expansão ocorreram para as curvas com raio 3D, uma redução das tensões atuantes de 12,33%, 21% e 11% e, para as curvas com raio 5D às reduções foram de 7,33%, 9,2% e 5,7%, respectivamente, com referência às curvas de raio 1D. Observa-se que a redução média das tensões para curvas de raio igual a 5D foi inferior a redução apresentada para curvas de raio 3D. Um resultado atípico ocorreu no nó 159 comparativamente aos nós 109 e 259, identificados na Figura 12. Nesse nó ocorreu um aumento da tensão atuante com o aumento do raio da curva.

De forma geral os resultados mostraram que a adoção de curvas fabricadas com maiores raios de curvatura tende a trazer benefícios à tubulação, através da redução das tensões atuantes, devendo ser analisada para cada caso durante a fase de projeto.

Devido à facilidade e ao baixo custo de fabricação de curvas a partir de tubos dobrados, a utilização de curvas de maiores raios apresenta maior viabilidade para tubulações de pequeno diâmetro, até 1 1/2" (in).

As curvas referentes às tensões médias atuantes na tubulação podem ser visualizadas na Figura 14.

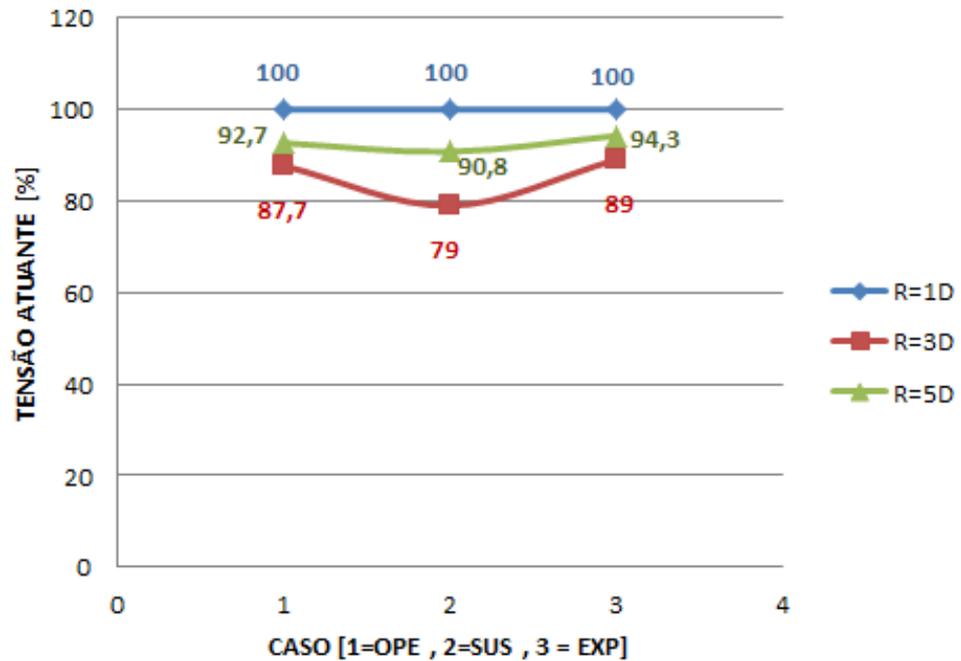


Figura 14: Tensões médias atuantes na tubulação (Casos estáticos).

#### 4.1.2 Esforços atuantes nas restrições

Na Tabela 10 estão apresentados os percentuais de redução esforços atuantes nos nós correspondente aos apoios e restrições, para os arranjos de tubulação que utilizam curvas de raio igual a 3D e 5D, tomando-se como referência as curvas de raio 1D.

**Tabela 10: Esforços atuantes nas restrições.**

CASO	NÓ	FORÇA	R = 1D	%	R = 3D	%	R = 5D	%
<b>CASO 1 (OPE)</b>	<b>10</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	-25	REF.	-24	-4	-23	-8
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-17	REF.	-17	0	-17	0
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	2	REF.	2	0	2	0
	<b>60</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	12	REF.	12	0	12	0
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-41	REF.	-41	0	-40	-2
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	-5	REF.	-6	+20	-6	0
	<b>110</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	10	REF.	10	0	11	+10
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-33	REF.	-34	+3	-36	+9
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
	<b>160</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	8	REF.	8	0	8	0
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-32	REF.	-31	-3	-29	-9
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	5	REF.	5	0	5	0
	<b>210</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	13	REF.	12	-8	12	-8
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-44	REF.	-41	-7	-40	-9
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	-15	REF.	-17	+13	-17	+13
	<b>260</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	-4	REF.	-4	0	-4	0
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-30	REF.	-31	+3	-33	+10
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	-8	REF.	-8	0	-9	+13
<b>310</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	-23	REF.	-24	+4	-24	+4	
	<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-21	REF.	-18	-14	-16	-24	
	<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	21	REF.	24	+14	24	+14	
<b>MÉDIA</b>		REFERÊNCIA		+1%		+0,6%		
<b>CASO 2 (SUS)</b>	<b>10</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-17	REF.	-17	0	-17	0
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
	<b>60</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-41	REF.	-41	0	-40	+2
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
	<b>110</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-33	REF.	-34	+3	-36	+9
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
	<b>160</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
		<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-32	REF.	-31	-3	-29	-9
		<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0
<b>210</b>	<b>F<sub>X</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0	
	<b>F<sub>Y</sub> [N]</b>	-44	REF.	-41	-7	-40	-9	
	<b>F<sub>Z</sub> [N]</b>	0	REF.	0	0	0	0	

**Continua**

**Tabela 10: Esforços atuantes nas restrições (Continuação).**

CASO	NÓ	FORÇA	R = 1D	%	R = 3D	%	R = 5D	%
CASO 2 (SUS)	260	F <sub>x</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>y</sub> [N]	-30	REF.	-31	+3	-33	+10
		F <sub>z</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
	310	F <sub>x</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>y</sub> [N]	-21	REF.	-18	-14	-16	-24
		F <sub>z</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
<b>MÉDIA</b>		REFERÊNCIA		-0,9 %		-1 %		
CASO 3 (EXP)	10	F <sub>x</sub> [N]	-25	REF.	-24	-4	-23	-8
		F <sub>y</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	2	REF.	2	0	2	0
	60	F <sub>x</sub> [N]	12	REF.	12	0	12	0
		F <sub>y</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	-5	REF.	-6	20	-6	20
	110	F <sub>x</sub> [N]	10	REF.	10	0	11	+10
		F <sub>y</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
	160	F <sub>x</sub> [N]	8	REF.	8	0	8	0
		F <sub>y</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	5	REF.	5	0	5	0
	210	F <sub>x</sub> [N]	13	REF.	12	8	12	8
		F <sub>y</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	-15	REF.	-17	+13	-17	+13
	260	F <sub>x</sub> [N]	-4	REF.	-4	0	-4	0
		F <sub>y</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	-8	REF.	-8	0	-9	+13
	310	F <sub>x</sub> [N]	-23	REF.	-24	+4	-24	+4
		F <sub>y</sub> [N]	0	REF.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	21	REF.	24	+14	24	+14
<b>MÉDIA</b>		REFERÊNCIA		-0,05%		+0,9 %		

A análise dos percentuais médios indicados na tabela 10 mostrou que ocorreu pouca variação dos esforços atuantes nas restrições, em função do aumento do raio das curvas. Para as curvas de raio 3D e 5D, o caso operação apresentou um aumento dos esforços de +1% e +0,6%. No caso Sustentação a redução dos esforços foi de -0,9% e -1% e, para o caso expansão a variação foi de -0,05% e +0,9%, respectivamente, com referência às curvas de raio 1D.

Para os casos estáticos analisados, o aumento do raio das curvas não trouxe nenhum benefício à redução dos esforços atuantes nas restrições, como pode ser observado na Figura 15.

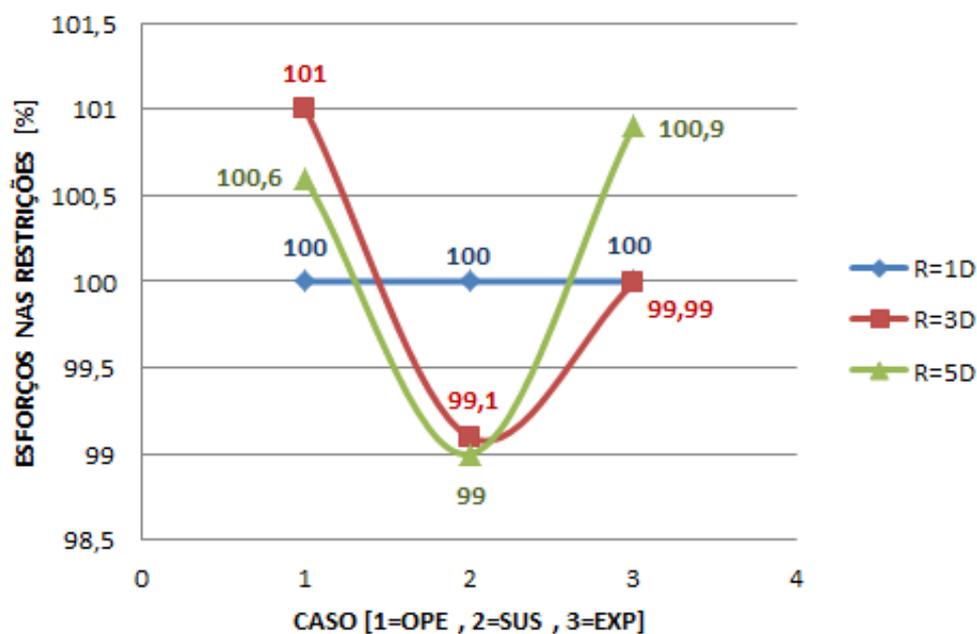


Figura 15: Esforços médios atuantes nas restrições (Caso estático).

#### 4.1.3 Deslocamento do ponto médio das curvas

Pode-se observar na Tabela 11 os deslocamentos máximos dos nós correspondentes aos pontos médios das curvas de raio 3D e 5D, tomando-se como referência a curva de raio 1D.

**Tabela 11: Deslocamentos dos pontos médios das curvas.**

CASO	NÓ	DESLOC.	R = 1D	R = 3D	R = 5D
CASO 1 (OPE)	109 (Curva 1)	D <sub>x</sub> [mm]	0,868	0,861	0,853
		D <sub>y</sub> [mm]	0,001	0,002	0,0
		D <sub>z</sub> [mm]	-0,012	-0,005	-0,002
	159 (Curva 2)	D <sub>x</sub> [mm]	0,654	0,674	0,690
		D <sub>y</sub> [mm]	0,0	0,0	-0,002
		D <sub>z</sub> [mm]	0,416	0,407	0,394
	259 (Curva 3)	D <sub>x</sub> [mm]	-0,214	-0,187	-0,164
		D <sub>y</sub> [mm]	0,0	-0,001	-0,004
		D <sub>z</sub> [mm]	-0,433	-0,426	-0,419
CASO 2 (SUS)	109 (Curva 1)	D <sub>x</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
		D <sub>y</sub> [mm]	0,001	0,002	0,002
		D <sub>z</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
	159 (Curva 2)	D <sub>x</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
		D <sub>y</sub> [mm]	0,0	0,0	-0,002
		D <sub>z</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
	259 (Curva 3)	D <sub>x</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
		D <sub>y</sub> [mm]	0,0	-0,001	-0,004
		D <sub>z</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
CASO 3 (EXP)	109 (Curva 1)	D <sub>x</sub> [mm]	0,868	0,861	0,853
		D <sub>y</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
		D <sub>z</sub> [mm]	0,012	-0,005	-0,002
	159 (Curva 2)	D <sub>x</sub> [mm]	0,654	0,674	0,690
		D <sub>y</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
		D <sub>z</sub> [mm]	0,416	0,407	0,394
	259 (Curva 3)	D <sub>x</sub> [mm]	-0,214	-1,187	-0,164
		D <sub>y</sub> [mm]	0,0	0,0	0,0
		D <sub>z</sub> [mm]	-0,433	-0,426	-0,419

Para os três casos de carga analisados, a variação dos valores dos deslocamentos foi insignificante, não justificando a adoção de curvas de maiores raios com objetivo de reduzir os deslocamentos da tubulação.

Nos casos avaliados não foi possível efetuar a análise dos percentuais de variação dos valores médios dos deslocamentos. Devido aos pequenos valores encontrados, alguns percentuais apresentaram grande amplitude de variação, distorcendo os valores dos percentuais médios calculados.

#### 4.1.4 Forças atuantes nas curvas

Na Tabela 12 estão quantificados os percentuais de redução das forças atuantes nos nós correspondentes aos pontos médios das curvas de raio 3D e 5D, tomando-se como referência a curva de raio 1D.

Os esforços estão representados nas três direções ortogonais, conforme indicado na Figura 12.

Tabela 12: Forças atuantes no ponto médio das curvas.

CASO	NÓ	FORÇA	R = 1D	%	R = 3D	%	R = 5D	%
CASO 1 (OPE)	109 (Curva 1)	F <sub>x</sub> [N]	-11	REFER.	-10	-9	-10	-9
		F <sub>y</sub> [N]	14	REFER.	14	0	14	0
		F <sub>z</sub> [N]	-4	REFER.	-4	0	-4	0
	159 (Curva 2)	F <sub>x</sub> [N]	-1	REFER.	1	0	1	0
		F <sub>y</sub> [N]	17	REFER.	15	-12	13	-24
		F <sub>z</sub> [N]	-4	REFER.	-4	0	-4	0
	259 (Curva 3)	F <sub>x</sub> [N]	26	REFER.	28	+8	28	+8
		F <sub>y</sub> [N]	14	REFER.	14	0	14	0
		F <sub>z</sub> [N]	-14	REFER.	-16	+14	-16	+14
VALOR MÉDIO		REFERÊNCIA		+0,11%		-1,22%		
CASO 2 (SUS)	109 (Curva 1)	F <sub>x</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
		F <sub>y</sub> [N]	14	REFER.	14	0	14	0
		F <sub>z</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
	159 (Curva 2)	F <sub>x</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
		F <sub>y</sub> [N]	17	REFER.	15	-12	13	-24
		F <sub>z</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
	259 (Curva 3)	F <sub>x</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
		F <sub>y</sub> [N]	14	REFER.	14	0	14	0
		F <sub>z</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
VALOR MÉDIO		REFERÊNCIA		-1,33%		-2,66%		
CASO 3 (EXP)	109 (Curva 1)	F <sub>x</sub> [N]	-11	REFER.	10	-9	-10	-9
		F <sub>y</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	-4	REFER.	-4	0	-4	0
	159 (Curva 2)	F <sub>x</sub> [N]	-1	REFER.	1	0	1	0
		F <sub>y</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	-4	REFER.	-4	0	-4	0
	259 (Curva 3)	F <sub>x</sub> [N]	26	REFER.	28	+8	28	+8
		F <sub>y</sub> [N]	0	REFER.	0	0	0	0
		F <sub>z</sub> [N]	-14	REFER.	-16	+14	-16	+14
VALOR MÉDIO		REFERÊNCIA		+1,44%		+1,44%		

A análise dos percentuais médios indicados na última coluna da Tabela 12 mostrou que ocorreu pouca variação das forças incidentes nas curvas em função do aumento do raio. Para as curvas de raio 3D e 5D, o caso operação apresentou um aumento dos esforços de +0,11% e uma redução de -1,22%, respectivamente. No caso sustentação a redução dos esforços foi de -1,33% e -2,66% e, para o caso expansão, o aumento foi de +1,44% e +1,44%, respectivamente, com referência às curvas de raio 1D.

Como pode ser observado na Figura 16, para os casos estáticos analisados, o aumento do raio das curvas não trouxe nenhum benefício significativo à redução dos esforços atuantes nos pontos médios das curvas.

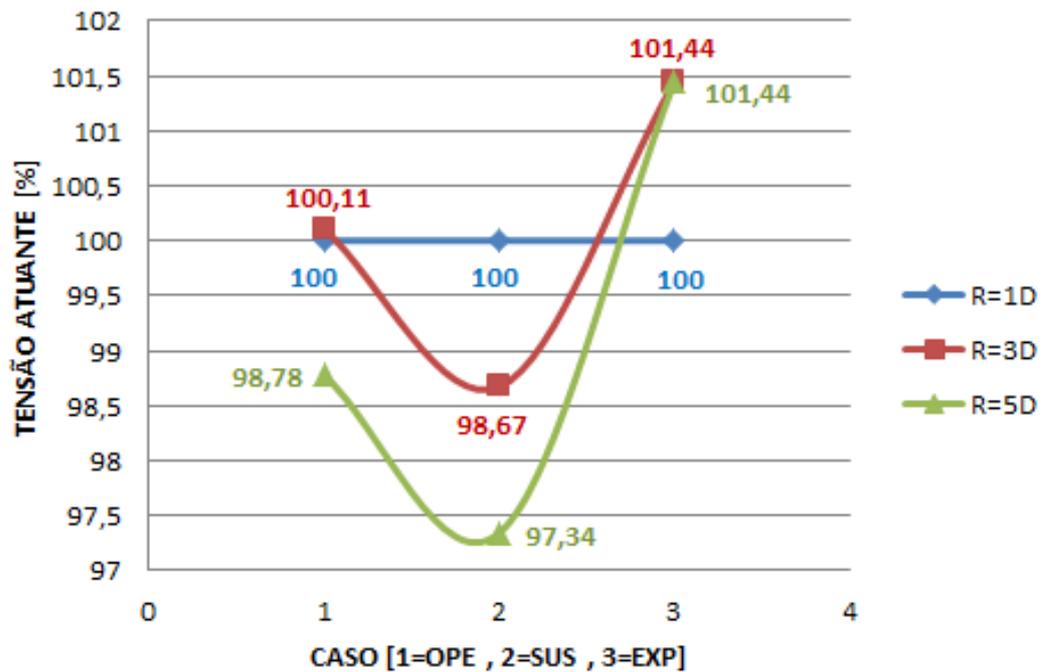


Figura 16: Força atuante no ponto médio das curvas (Casos estáticos).

## 4.2 Comportamento dinâmico da tubulação

O comportamento dinâmico dos três sistemas de tubulação, quando submetidos ao escoamento bifásico no padrão pistonado, composto por frações de 10%, 25%, 50% e 75% de ar, com complemento em água, constituiu o principal objetivo do estudo. Um total de 48 cenários foi avaliado, compostos por três conjuntos de tubulação com arranjos idênticos, porém, utilizando curvas de diferentes raios (1D, 2D e 3D) e, por cinco diferentes velocidades de escoamento (2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s e 10 m/s). Os resultados foram apresentados de forma similar à análise estática, que considerou a análise das propriedades referentes às tensões máximas atuantes na tubulação, esforços atuantes nas restrições, os deslocamentos e as forças atuantes nas curvas. A consideração especial às curvas justificou-se pelo fato de serem estes os pontos de mudança de direção, onde os esforços incidentes provenientes da variação da quantidade de movimento da massa fluida são os mais significativos e mais susceptíveis a vibração. Quanto à análise das restrições, compostas basicamente por ancoragens, guias e apoios, constituem os pontos de sustentação e limitação do movimento da tubulação, e que absorvem as solicitações dinâmicas originadas por forças de impacto alternadas. Quanto menor a magnitude desses esforços, menor a resistência estrutural necessária para o suporte e, conseqüentemente, menor o custo.

Nos itens 4.2.1 ao 4.2.5 estão apresentados os quadros comparativos dos resultados obtidos na simulação, e a análise detalhada do comportamento dinâmico dos três sistemas de tubulações propostos, submetidas ao escoamento bifásico no padrão pistonado.

#### 4.2.1 Frequência natural de vibração (Modal)

Os três primeiros modos de vibração para as três configurações de tubulação propostas estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Frequências naturais de vibração.

MODO DE VIBRAR	FREQUÊNCIAS NATURAIS [HERTZ]		
	(RAIO = 1D)	(RAIO = 3D)	(RAIO = 5D)
1	11,589	12,036	12,281
2	21,682	23,542	24,310
3	83,699	83,900	81,448

Os valores das frequências naturais, para as três configurações de tubulação, não sofreram variação significativa. A análise modal forneceu três modos de vibração, sendo a menor frequência encontrada de 11,589 Hz, correspondente ao primeiro modo de vibração, que contempla o arranjo que utilizou curvas de raio curto ( $R = 1D$ ). Com o aumento do raio da curva notou-se uma pequena tendência de aumento da frequência natural da tubulação. Importante destacar que para linhas conectadas a equipamentos rotativos e alternativos, a menor frequência recomendada é de 2 Hz e 5 Hz, respectivamente. Nesse caso, a menor frequência natural da tubulação deve ser superior aos valores citados, evitando-se dessa forma a aproximação com frequências de excitação provenientes de eventuais equipamentos conectados à tubulação, e conseqüentemente grandes amplitudes de vibração decorrentes do fenômeno de ressonância.

O aumento do raio das curvas não constituiu uma alternativa interessante para o aumento da frequência da linha. Quando necessário o aumento da frequência natural de um sistema de tubulação, adiciona-se maior grau de restrição à tubulação, através do incremento do número de guias e batentes.

#### **4.2.2 Tensões atuantes na tubulação**

As tensões atuantes nas tubulações estão apresentadas nas Tabelas 14, 15, 16 e 17. Um resumo dos percentuais de redução das tensões nas atuantes que utilizam curvas de raios 3D e 5D, tomando-se como referência as curvas de raio 1D, pode ser visto na Tabela 18.

As últimas colunas das tabelas mostram a taxa média de redução das tensões atuantes. A título de informação, a tensão máxima atuante em um ponto genérico da tubulação foi também citada.

Considerando que o principal objetivo do presente trabalho foi à análise do comportamento dinâmico dos pontos de maior sollicitação, representados pelos nós 109 (Curva 1), 159 (Curva 2) e 259 (Curva 3), o valor da tensão máxima atuante na tubulação não foi considerado no cálculo do percentual médio de redução das tensões.

Tabela 14: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 10\%$ ).

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA 1)	159 (CURVA 2)	259 (CURVA 3)	MÁX / NÓ	MÉDIA %
	RAIO	TENSÃO ATUANTE [Kpa]				
2	R = 1D	1414	1325	1679	3356,6	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	873	669	1048	2481,6	42
	%	38	50	38	26	
	R = 5D	820	728	956	2134,20	43
	%	42	45	43	36	
4	R = 1D	5232	4948	5634	9001,6	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	2920	2614	3806	7556	41
	%	44	47	32	16	
	R = 5D	2424	2264	3119	6188,6	51
	%	54	54	45	31	
6	R = 1D	11644	11047	11904	17847,4	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	7478	6953	8605	16101,3	33
	%	36	37	27	10	
	R = 5D	5435	5144	7241	13923,4	48
	%	53	53	39	22	
8	R = 1D	20428	19414	19911	28955,1	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	13971	13137	14692	26713,8	30
	%	32	32	26	8	
	R = 5D	11308	10774	12855	23999,7	42
	%	45	45	35	17	
10	R = 1D	31100	29591	28514	40471,4	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	22252	21036	21529	38255,5	27
	%	28	29	24	5	
	R = 5D	18940	18086	19310	35278,4	37
	%	39	39	32	13	

Tabela 15: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 25\%$ ).

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA 1)	159 (CURVA 2)	259 (CURVA 3)	MÁX / NÓ	MÉDIA %
	RAIO	TENSÃO ATUANTE [Kpa]				
2	R = 1D	1221	1142	1463	3024,5	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	779	583	939	2271,9	40
	%	36	49	36	25	
	R = 5D	729	643	848	1956,7	42
	%	40	44	42	35	
4	R = 1D	4406	4164	4765	7739,6	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	2467	2187	3228	6486,6	41
	%	44	47	32	16	
	R = 5D	2065	1922	2650	5304,1	50
	%	53	54	44	31	
6	R = 1D	9750	9248	10045	15157,1	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	6265	5802	7249	13652,2	34
	%	36	37	28	10	
	R = 5D	4577	4324	6105	11790,9	48
	%	53	53	39	22	
8	R = 1D	17085	16233	17737	24491,1	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	11692	10970	12358	22569,3	31
	%	32	32	30	8	
	R = 5D	9433	8979	10801	20235	43
	%	45	45	39	17	
10	R = 1D	26040	24772	23969	34179	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	18640	17597	18106	32279	27
	%	28	29	24	6	
	R = 5D	15782	15061	16207	29697,9	37
	%	39	39	32	13	

**Tabela 16: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 50\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA 1)	159 (CURVA 2)	259 (CURVA 3)	MÁX / NÓ	MÉDIA %
	RAIO	TENSÃO ATUANTE [Kpa]				
4	R = 1D	3031	2860	3316	5633,6	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	1724	1486	2269	4708,6	41
	%	43	48	32	16	
	R = 5D	1469	1353	1872	3837,8	50
	%	52	53	44	32	
6	R = 1D	6594	6249	6847	10629,9	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	4425	3872	4980	9542,4	33
	%	33	38	27	10	
	R = 5D	3146	2957	4199	8208,6	48
	%	52	53	39	23	
8	R = 1D	11500	10921	11382	16942,6	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	7891	7357	8422	15565,2	30
	%	31	33	26	8	
	R = 5D	6340	6018	7349	13893,1	42
	%	45	45	35	18	
10	R = 1D	17550	16689	16283	23517,1	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	12583	11832	12317	22154	27
	%	28	29	24	6	
	R = 5D	10564	10064	10990	20285,2	38
	%	40	40	33	14	

**Tabela 17: Percentuais de redução das tensões atuantes nas curvas ( $\beta = 75\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA 1)	159 (CURVA 2)	259 (CURVA 3)	MÁX / NÓ	MÉDIA %
	RAIO	TENSÃO ATUANTE [Kpa]				
8	R = 1D	5815	5605	5950	9263,3	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	4082	3737	4427	8440,8	30
	%	30	33	26	9	
	R = 5D	3294	3104	3867	7429,9	41
	%	43	45	35	20	
10	R = 1D	8974	8525	8439	12606,5	100
	%	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	
	R = 3D	6435	5981	6397	11781,1	27
	%	28	30	24	7	
	R = 5D	5401	5121	5704	10709,5	37
	%	40	40	32	15	

**Tabela 18: Percentual médio de redução das tensões atuantes nas curvas (Resumo).**

VELOCIDADE [m/s]	FRAÇÃO DE AR - $\beta$	10%	25%	50%	75%	MÉDIA %
	RAIO DA CURVA	PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS TENSÕES ATUANTES [%]				
2	R = 3D	42	40	-	-	41
	R = 5D	43	42	-	-	42,5
4	R = 3D	41	41	41	-	41
	R = 5D	51	50	50	-	50,3
6	R = 3D	33	34	33	-	33,3
	R = 5D	48	48	48	-	48
8	R = 3D	30	31	30	30	30,20
	R = 5D	42	43	42	41	42
10	R = 3D	27	27	27	27	27
	R = 5D	37	37	38	37	37,20
MÉDIA	R = 3D					34,50
	R = 5D					44

A análise do nível de tensão mostrou que os valores das tensões médias atuantes na tubulação representaram 2,23% da tensão máxima admissível. A baixa pressão e temperatura utilizada na análise foram os principais fatores responsáveis pela pequena magnitude das tensões.

Verificou-se um aumento significativo das tensões atuantes nas curvas em função do aumento da velocidade superficial média do fluido. A tensão atuante é diretamente proporcional à força exercida pela massa fluida na tubulação, e esta, por sua vez, é proporcional à quantidade de movimento que varia com o quadrado da velocidade de escoamento.

De forma geral ocorreu uma diminuição considerável das tensões atuantes com o aumento do raio da curva. A substituição das curvas de raio igual a 1D por curvas de raio 3D e 5D permitiu uma redução média dos valores das tensões atuantes nas curvas na ordem de 34,5 % e 44 %, respectivamente, como mostrado na Tabela 18.

Com o aumento da velocidade de escoamento, ocorreu uma diminuição do efeito do aumento do raio das curvas na taxa de redução das tensões. Em outras palavras, quanto maior a velocidade do escoamento, menor o efeito do aumento do raio das curvas na redução das tensões.

A análise dos percentuais médios de redução das tensões indicou que as tensões atuantes apresentaram pouca variação em função das frações das fases presentes no escoamento.

Estão representados na Figura 17 os percentuais de variação das tensões atuantes no ponto médio das curvas, em função da velocidade superficial média do escoamento e do raio da curva.

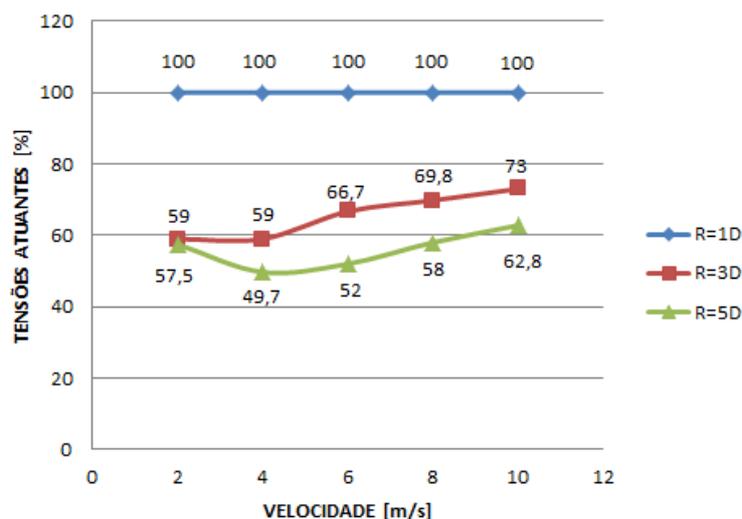


Figura 17: Tensões médias atuantes na tubulação.

#### 4.2.3 Esforços atuantes nas restrições

Os esforços atuantes nas restrições estão apresentados nas Tabelas 19, 20, 21 e 22. A Tabela 23 contém um resumo dos percentuais de redução dos esforços para os arranjos que utilizam curvas de raios 3D e 5D, tomando-se como referência as curvas de raio 1D.

Conforme mostrado na Figura 12, os nós 10 e 310 são as ancoragens. As guias transversais estão presentes nos nós 60 e 210, originando esforços somente na direção “Z”. Como não constam batentes na direção longitudinal do tubo, os esforços atuantes nesses nós na direção “X” são nulos, não sendo informados na tabela. Os apoios simples estão posicionados nos nós 60, 110, 160, 210 e 260.

Os esforços atuantes nos apoios, na direção “Y”, perpendicular ao plano da tubulação, são devido ao peso da tubulação acrescido do fluido conduzido. Os resultados da análise mostraram que as variações das cargas no eixo “Y”, em função dos raios das curvas e da velocidade do fluido, não sofreram alteração, não sendo por essa razão informados nas tabelas.

Os esforços nas restrições incidentes nas direções “X” e “Z”, contidos no mesmo plano da tubulação, foram originados pelas forças induzidas decorrentes principalmente da variação da quantidade de movimento da massa fluida. Esses esforços tem significado especial nos nós das ancoragens (10 e 310) e nos nós que contem as guias laterais (60 e 210).

**Tabela 19: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 10\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	10		60	210	310		MÉDIA %
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
2	R = 1D	5	4	9	8	7	4	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	4	2	6	5	5	3	33
	%	20	50	33	38	29	25	
	R = 5D	3	2	5	5	4	3	40
	%	40	50	44	38	43	25	
4	R = 1D	24	17	39	35	31	19	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	18	13	29	24	27	14	24
	%	25	24	26	31	13	26	
	R = 5D	16	10	24	20	22	13	36
	%	33	41	38	43	29	32	
6	R = 1D	59	39	89	81	69	48	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	48	33	77	68	65	38	15
	%	19	15	14	16	6	21	
	R = 5D	38	27	60	50	57	32	31
	%	36	31	33	38	17	33	
8	R = 1D	108	67	157	145	117	91	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	91	59	141	131	113	70	13
	%	16	12	10	10	4	23	
	R = 5D	80	51	121	109	102	64	24
	%	26	24	23	25	13	30	
10	R = 1D	171	99	235	222	168	145	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	147	91	220	211	166	114	9
	%	14	8	6	5	1	21	
	R = 5D	132	82	197	186	155	103	18
	%	23	17	16	16	8	29	

**Tabela 20: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 25\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	10		60	210	310		MÉDIA %
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
2	R = 1D	4	3	7	6	6	3	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	3	2	5	4	4	2	31
	%	25	33	29	33	33	33	
	R = 5D	3	2	4	4	4	2	33
	%	25	33	43	33	33	33	
4	R = 1D	20	14	33	29	26	16	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	14	11	24	20	22	12	25
	%	30	21	27	31	15	25	
	R = 5D	13	9	20	17	19	11	35
	%	35	36	39	41	27	31	
6	R = 1D	49	32	75	68	58	40	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	40	27	64	57	54	31	16
	%	18	16	15	16	7	22	
	R = 5D	32	22	50	42	47	27	31
	%	35	31	33	38	19	32	
8	R = 1D	90	56	131	121	98	76	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	75	50	118	109	94	59	12
	%	17	11	10	10	4	22	
	R = 5D	66	43	101	90	86	53	24
	%	27	23	23	26	12	30	
10	R = 1D	143	83	197	186	141	120	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	123	76	184	176	139	95	9
	%	14	8	7	5	1	21	
	R = 5D	110	68	164	154	129	86	19
	%	23	18	17	17	9	28	

Tabela 21: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 50\%$ ).

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	10		60	210	310		MÉDIA %
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
4	R = 1D	13	9	22	19	17	10	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	9	6	16	13	15	8	26
	%	31	33	27	32	12	20	
	R = 5D	9	6	13	11	12	7	34
	%	31	33	41	42	29	30	
6	R = 1D	32	21	50	45	39	26	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	26	18	42	36	36	20	17
	%	19	14	16	20	8	23	
	R = 5D	21	15	33	28	31	18	31
	%	34	29	34	38	20	31	
8	R = 1D	60	37	87	80	66	50	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	50	33	79	73	63	39	12
	%	17	11	9	9	5	22	
	R = 5D	44	28	67	60	57	35	24
	%	27	24	23	25	14	30	
10	R = 1D	95	56	132	124	95	80	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	82	51	124	118	94	64	9
	%	14	9	6	5	1	20	
	R = 5D	72	45	109	102	87	57	19
	%	24	20	17	18	8	29	

**Tabela 22: Percentuais de redução dos esforços atuantes nas restrições ( $\beta = 75\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	10		60	210	310		MÉDIA [%]
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
8	R = 1D	30	19	44	40	33	25	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	25	16	39	36	32	19	12
	%	17	16	11	10	3	24	
	R = 5D	22	14	33	29	29	17	23
	%	27	26	25	28	12	32	
10	R = 1D	47	28	66	62	48	40	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	41	25	62	59	47	32	9
	%	13	11	6	5	2	20	
	R = 5D	36	21	54	51	44	28	19
	%	23	25	18	18	8	30	

**Tabela 23: Percentual médio de redução dos esforços atuantes nas restrições (Resumo).**

VELOCIDADE [m/s]	FRAÇÃO DE AR - $\beta$	10%	25%	50%	75%	MÉDIA [%]
	RAIO DA CURVA	PERCENTUAL DE REDUÇÃO DOS ESFORÇOS ATUANTES NAS RESTRIÇÕES [%]				
2	R = 3D	33	31	-	-	32
	R = 5D	40	33	-	-	36,5
4	R = 3D	24	25	26	-	25
	R = 5D	36	35	34	-	35
6	R = 3D	15	16	17	-	16
	R = 5D	31	31	31	-	31
8	R = 3D	13	12	12	12	12,25
	R = 5D	24	24	24	23	23,75
10	R = 3D	9	9	9	9	9
	R = 5D	18	19	19	19	18,75
MÉDIA	R = 3D					18,85
	R = 5D					29

Os valores encontrados referentes aos esforços atuantes nas restrições foram diretamente proporcionais à velocidade média superficial do escoamento. Quanto maior a velocidade, maior o esforço na restrição.

A análise dos valores constantes da Tabela 23 mostrou que ocorreu uma diminuição dos esforços atuantes nas restrições em função do aumento do raio das curvas. A substituição das curvas de raio igual a 1D por curvas de raio 3D e 5D possibilitou uma redução média desses esforços na ordem de 18,85 % e 29 %, respectivamente.

A influência da velocidade no percentual de redução dos esforços nas restrições, em função do aumento do raio das curvas, ficou evidenciada. Quanto maior a velocidade, menor o efeito do aumento do raio das curvas na diminuição desses esforços.

Os esforços nas restrições apresentaram pouca variação em função das frações de fase presentes no escoamento.

As variações médias dos esforços atuantes nas restrições podem ser visualizadas na Figura 18.

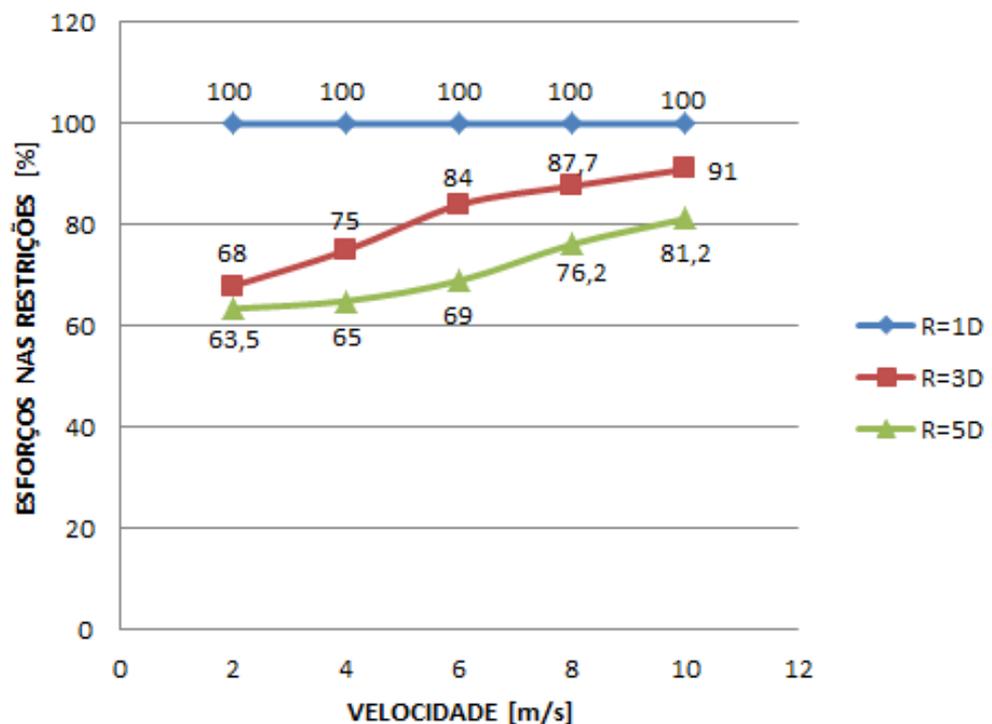


Figura 18: Esforços médios atuantes nas restrições.

#### **4.2.4 Deslocamento do ponto médio das curvas**

Nas Tabelas 24, 25, 26 e 27 estão apresentados os deslocamentos máximos do ponto médio das curvas 1, 2 e 3. Na Tabela 28 tem-se um resumo dos percentuais de redução dos deslocamentos, para os arranjos que utilizam curvas de raios 3D e 5D, tomando-se como referência as curvas de raio 1D.

Como pode ser observado na Figura 12, o deslocamento do nó 109 (Curva 1) na direção “X”, foi limitado pela ancoragem presente no nó 10. O principal deslocamento nesse ponto ocorreu na direção “Z”. O nó 159 (Curva 2) possui liberdade de movimento nos eixos “X e Z”. Quanto ao nó 259 (Curva 3), o deslocamento no eixo “Z” foi limitado pela ancoragem presente no nó 310. O principal deslocamento ocorreu na direção “X”.

Nos resultados apresentados verificou-se pequenos deslocamentos dos pontos médios das curvas 1 e 3 nas direções “X” e “Z”, respectivamente. Esses deslocamentos são interpretados como negativos, originados pela rotação das curvas 1 e 3 em torno dos pontos de ancoragens, correspondente aos nós 10 e 310, respectivamente. Por essa razão, os pequenos deslocamentos das curvas 1 e 3 nas direções “X e Z” foram apresentados nas referidas tabelas, porém, não foram considerados na composição dos valores médios dos deslocamentos.

**Tabela 24: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 10\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109		159		259		MÉDIA %
	DIREÇÃO	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	
2	R = 1D	0,0010	0,1313	0,1245	0,1315	0,1244	0,0008	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0019	0,0821	0,0778	0,0822	0,0778	0,0016	37
	%	90	37	38	37	37	100	
	R = 5D	0,0029	0,0738	0,0698	0,0740	0,0700	0,0026	44
	%	190	44	44	44	44	225	
4	R = 1D	0,0040	0,5488	0,5121	0,5491	0,5110	0,0034	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0101	0,4252	0,4114	0,4260	0,4117	0,0087	21
	%	+152	23	20	22	19	+156	
	R = 5D	0,0136	0,3402	0,3284	0,3413	0,3293	0,0122	37
	%	+240	38	36	38	36	+259	
6	R = 1D	0,0086	1,2104	1,1156	1,2108	1,1150	0,0074	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0231	1,0189	0,9630	1,0204	0,9633	0,0202	15
	%	+169	16	14	16	14	173	
	R = 5D	0,0343	0,8480	0,8219	0,8508	0,8242	0,0306	28
	%	+299	30	26	30	26	313	
8	R = 1D	0,0143	2,0550	1,8664	2,0556	1,8652	0,0122	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0388	1,7702	1,6386	1,7724	1,6384	0,0339	13
	%	171	14	12	14	12	178	
	R = 5D	0,0591	1,5373	1,4474	1,5412	1,4501	0,0530	24
	%	313	25	22	25	22	334	
10	R = 1D	0,0199	2,9622	2,6288	2,9628	2,6267	0,0170	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0547	2,6094	2,3578	2,6117	2,3564	0,0480	11
	%	175	12	10	12	10	182	
	R = 5D	0,0852	2,3289	2,1344	2,3332	2,1365	0,0768	20
	%	328	21	19	21	19	352	

**Tabela 25: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 25\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109		159		259		MÉDIA %
	DIREÇÃO	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	
2	R = 1D	0,0008	0,1093	0,1035	0,1093	0,1035	0,0007	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0016	0,0692	0,0656	0,0694	0,0656	0,0014	37
	%	100	37	37	37	37	100	
	R = 5D	0,0024	0,0612	0,0579	0,0614	0,0580	0,0021	44
	%	200	44	44	44	44	200	
4	R = 1D	0,0033	0,4578	0,4273	0,4580	0,4271	0,0028	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0084	0,3541	0,3428	0,3548	0,3431	0,0073	22
	%	155	23	20	23	20	161	
	R = 5D	0,0114	0,2831	0,2732	0,2840	0,2739	0,0101	37
	%	245	38	36	38	36	261	
6	R = 1D	0,0072	1,0119	0,9336	1,0123	0,9331	0,0062	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0194	0,8515	0,8056	0,8528	0,8059	0,0169	16
	%	169	16	14	16	14	173	
	R = 5D	0,0286	0,7088	0,6872	0,7111	0,6892	0,0256	28
	%	297	30	26	30	26	313	
8	R = 1D	0,0120	1,7207	1,5649	1,7212	1,5640	0,0102	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0325	1,4823	1,3736	1,4841	1,3725	0,0284	13
	%	171	14	12	14	12	178	
	R = 5D	0,0495	1,2854	1,2120	1,2887	1,2144	0,0444	24
	%	313	25	23	25	22	335	
10	R = 1D	0,0167	2,4834	2,2066	2,4839	2,2049	0,0142	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0459	2,1879	1,9790	2,1898	1,9778	0,0403	11
	%	175	12	10	12	10	184	
	R = 5D	0,0716	1,9485	1,7892	1,9522	1,7910	0,0645	20
	%	329	22	19	21	19	354	

**Tabela 26: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 50\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109		159		259		MÉDIA %
	DIREÇÃO	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	
4	R = 1D	0,0022	0,3059	0,2856	0,3060	0,2855	0,0019	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0056	0,2359	0,2287	0,2364	0,2289	0,0049	22
	%	155	23	20	23	20	158	
	R = 5D	0,0076	0,1883	0,1817	0,1889	0,1822	0,0067	37
	%	245	38	36	38	36	253	
6	R = 1D	0,0048	0,6785	0,6270	0,6787	0,6267	0,0041	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0131	0,5729	0,5440	0,5738	0,5443	0,0114	14
	%	173	16	13	15	13	178	
	R = 5D	0,0192	0,4750	0,4608	0,4766	0,4622	0,0171	28
	%	300	30	27	30	26	317	
8	R = 1D	0,0081	1,1568	1,0545	1,1572	1,0539	0,0069	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0219	0,9965	0,9252	0,9977	0,9252	0,0192	13
	%	170	14	12	14	12	178	
	R = 5D	0,0334	0,8620	0,8149	0,8642	0,8166	0,0299	24
	%	312	25	23	25	23	333	
10	R = 1D	0,0113	1,6737	1,4904	1,6741	1,4892	0,0096	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0311	1,4748	1,3364	1,4762	1,3356	0,0272	11
	%	175	12	10	12	10	183	
	R = 5D	0,0483	1,3086	1,2056	1,3112	1,2070	0,0435	20
	%	327	22	19	22	19	353	

**Tabela 27: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas ( $\beta = 75\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109		159		259		MÉDIA %
	DIREÇÃO	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	D <sub>x</sub> [mm]	D <sub>z</sub> [mm]	
8	R = 1D	0,0041	0,5848	0,5344	0,5850	0,5341	0,0035	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0111	0,5032	0,4684	0,5039	0,4684	0,0097	13
	%	170	14	12	14	12	177	
	R = 5D	0,0169	0,4346	0,4120	0,4358	0,4129	0,0151	24,5
	%	312	26	23	26	23	331	
10	R = 1D	0,0057	0,8473	0,7562	0,8475	0,7556	0,0049	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	0,0158	0,7452	0,6772	0,7459	0,6769	0,0138	11
	%	177	12	10	12	10	182	
	R = 5D	0,0245	0,6602	0,6102	0,6615	0,6110	0,0221	20,5
	%	330	22	19	22	19	351	

**Tabela 28: Percentuais de redução dos deslocamentos das curvas (Resumo).**

VELOCIDADE [m/s]	FRAÇÃO DE AR - $\beta$	10%	25%	50%	75%	MÉDIA [%]
	RAIO DA CURVA	PERCENTUAL DE REDUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DAS CURVAS [%]				
2	R = 3D	37	37	-	-	37
	R = 5D	44	44	-	-	44
4	R = 3D	21	22	22	-	21,6
	R = 5D	37	37	37	-	37
6	R = 3D	15	16	14	-	15
	R = 5D	28	28	28	-	28
8	R = 3D	13	13	13	13	13
	R = 5D	24	24	24	24	24
10	R = 3D	11	11	11	11	11
	R = 5D	20	20	21	21	20,5
MÉDIA	R = 3D					19,52
	R = 5D					30,7

Os resultados referentes aos valores médios dos deslocamentos no ponto médio das curvas mostraram que quanto maior a velocidade do escoamento, maior o deslocamento.

Os resultados constantes da Tabela 28 indicaram que ocorreu uma diminuição dos deslocamentos com o aumento do raio das curvas. A substituição das curvas de raio igual a 1D por curvas de raio 3D e 5D permitiu uma redução média dos valores dos deslocamentos no ponto médio das curvas na ordem de 19,52 % e 30,7 %, respectivamente.

Outra observação que se faz refere-se à influência da velocidade superficial média no percentual de redução dos deslocamentos, em função do raio das curvas. Quanto maior a velocidade, menor o efeito do aumento do raio da curva na diminuição dos deslocamentos.

Quanto à influência da variação das frações de fase presentes no escoamento no valor médio dos deslocamentos, observaram-se alterações pouco significativas.

Na Figura 19 estão representadas as variações médias dos deslocamentos do ponto médio das curvas.

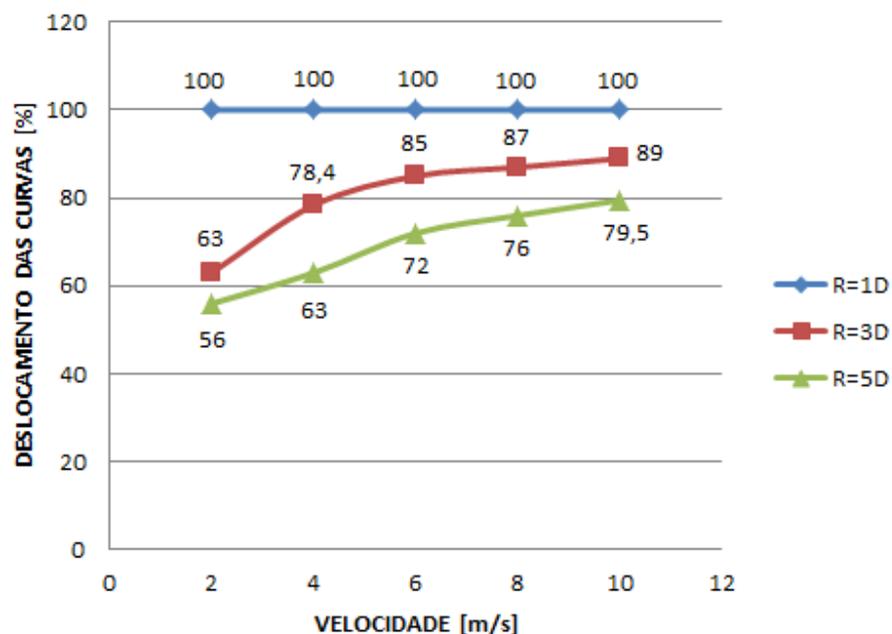
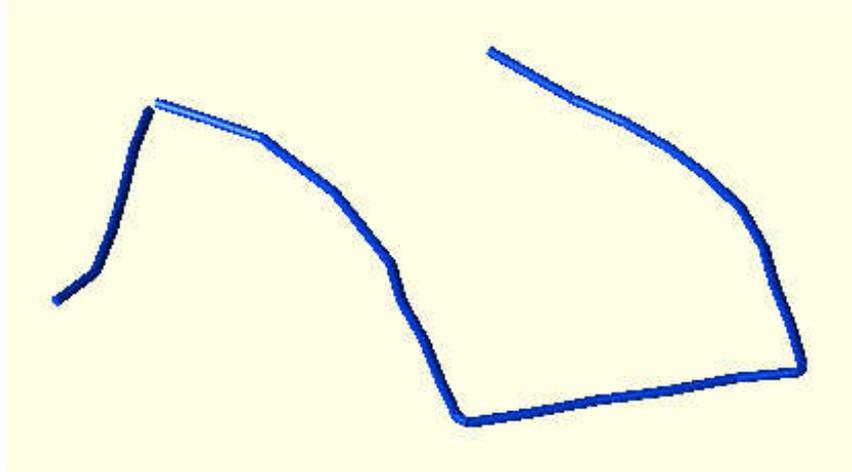
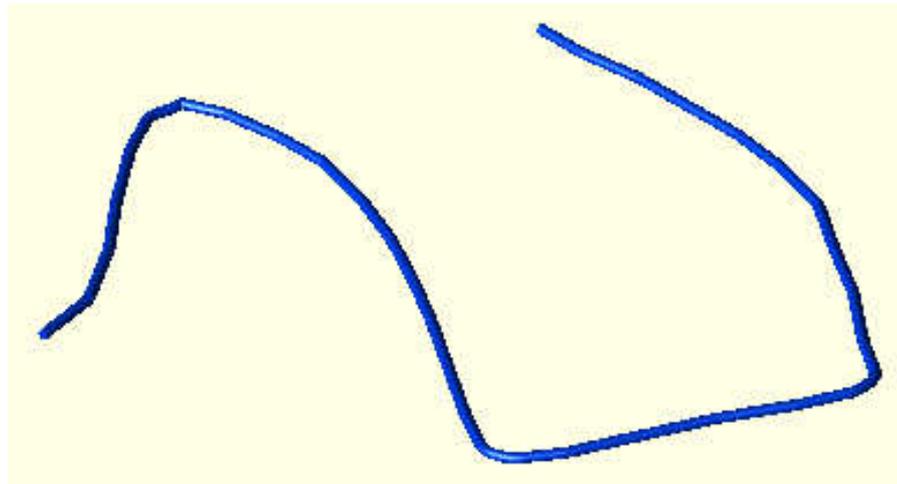


Figura 19: Deslocamentos dos pontos médios das curvas.

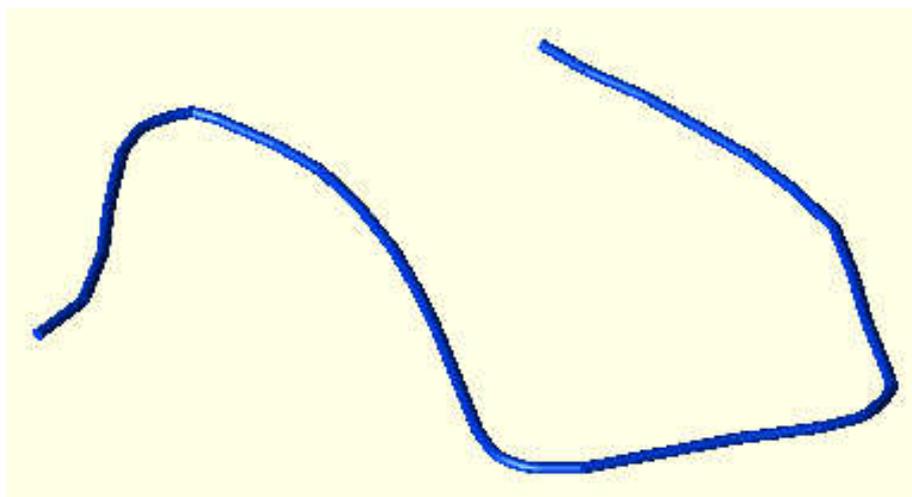
A Figura 20 ilustra a simulação dos deslocamentos dos três arranjos de tubulação, modelados com curvas de raio 1D, 3D e 5D.



(a)



(b)



(c)

**Figura 20: Deslocamentos da tubulação.**  
(a):  $R = 1D$ , (b):  $R = 3D$ , (c):  $R = 5D$

#### **4.2.5 Força atuante no ponto médio das curvas**

As forças atuantes nos pontos médios das curvas 1, 2 e 3 estão apresentadas nas Tabelas 29, 30, 31, 32. A Tabela 33 contém um resumo dos percentuais de redução das forças para os arranjos de tubulação que utilizam curvas de raios 3D e 5D, tomando-se como referência as curvas de raio 1D.

Tabela 29: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 10\%$ ).

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA1)		159 (CURVA 2)		259 (CURVA 3)		MÉDIA %
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
2	R = 1D	5	3	3	3	6	3	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	4	2	2	2	4	2	31
	%	20	33	33	33	33	33	
	R = 5D	3	2	2	2	4	2	34
	%	40	33	33	33	33	33	
4	R = 1D	24	13	16	15	27	15	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	18	10	12	11	24	11	23
	%	25	23	25	27	11	27	
	R = 5D	16	8	10	11	20	9	34
	%	33	38	38	27	26	40	
6	R = 1D	59	30	37	40	64	35	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	48	26	33	30	57	30	16
	%	19	13	11	25	11	14	
	R = 5D	38	21	26	26	51	22	31
	%	36	30	30	35	20	37	
8	R = 1D	108	55	66	78	114	62	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	90	48	62	55	98	56	15
	%	17	13	6	29	14	10	
	R = 5D	80	43	54	52	92	47	24
	%	26	22	18	33	19	24	
10	R = 1D	171	85	102	125	170	94	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	147	76	99	91	147	90	12
	%	14	11	3	27	14	4	
	R = 5D	132	70	90	81	137	80	20
	%	23	18	12	35	19	15	

**Tabela 30: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 25\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA1)		159 (CURVA 2)		259 (CURVA 3)		MÉDIA %
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
2	R = 1D	4	2	3	2	5	2	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	3	1	2	2	4	2	21
	%	25	50	33	0	20	0	
	R = 5D	3	1	2	2	3	1	33
	%	25	50	33	0	40	50	
4	R = 1D	20	10	13	12	23	12	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	14	8	10	9	20	9	23
	%	30	20	23	25	13	25	
	R = 5D	13	7	8	9	17	7	33
	%	35	30	38	25	26	42	
6	R = 1D	49	25	31	34	54	29	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	40	21	27	25	47	24	17
	%	18	16	13	26	13	17	
	R = 5D	32	18	21	22	43	19	31
	%	35	28	32	35	20	34	
8	R = 1D	90	46	55	65	95	51	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	75	40	52	46	82	47	15
	%	17	13	5	30	14	8	
	R = 5D	66	36	45	43	77	39	24
	%	27	22	18	34	19	24	
10	R = 1D	142	71	85	104	142	79	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	123	63	83	76	123	75	12
	%	13	11	2	27	13	5	
	R = 5D	109	58	75	67	114	66	21
	%	23	18	12	36	20	16	

**Tabela 31: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 50\%$ ).**

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA1)		159 (CURVA 2)		259 (CURVA 3)		MÉDIA %
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
4	R = 1D	13	7	8	8	15	8	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	9	5	6	6	13	6	26
	%	31	29	25	25	20	25	
	R = 5D	9	4	5	6	11	5	34
	%	31	43	38	25	27	38	
6	R = 1D	32	17	20	22	36	19	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	26	14	18	16	32	16	17
	%	19	18	10	27	11	16	
	R = 5D	21	12	14	14	28	22	28
	%	34	29	30	36	22	16	
8	R = 1D	60	30	37	43	63	34	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	50	27	34	31	55	31	14
	%	17	10	8	28	13	9	
	R = 5D	44	24	30	28	51	26	24
	%	27	20	19	35	19	24	
10	R = 1D	95	47	57	69	95	53	100
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	82	42	55	50	83	50	13
	%	14	11	4	28	13	6	
	R = 5D	72	38	49	44	77	44	22
	%	24	19	14	36	19	17	

Tabela 32: Percentual de redução das forças atuantes nas curvas ( $\beta = 75\%$ ).

VELOCIDADE [m/s]	NÓ	109 (CURVA 1)		159 (CURVA 2)		259 (CURVA 3)		MÉDIA %
	DIREÇÃO	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	
8	R = 1D	30	15	18	21	32	17	
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	25	13	17	15	28	15	15
	%	17	13	6	29	13	12	
	R = 5D	22	12	14	14	26	13	24
	%	27	20	22	33	19	24	
10	R = 1D	47	23	28	34	48	26	
	%	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	REFER.	
	R = 3D	41	21	27	25	41	25	12
	%	13	9	4	26	15	4	
	R = 5D	36	19	24	22	38	22	21
	%	23	17	14	35	21	15	

Tabela 33: Percentual médio de redução das forças atuantes nas curvas (Resumo).

VELOCIDADE [m/s]	FRAÇÃO DE AR - $\beta$	10%	25%	50%	75%	MÉDIA [%]
	RAIO DA CURVA	PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS FORÇAS ATUANTES NAS CURVAS [%]				
2	R = 3D	31	21	-	-	26
	R = 5D	34	33	-	-	33,5
4	R = 3D	23	23	26	-	24
	R = 5D	34	33	34	-	33,6
6	R = 3D	16	17	17	-	16,7
	R = 5D	31	28	28	-	29
8	R = 3D	15	14	14	15	14,5
	R = 5D	24	24	24	24	24
10	R = 3D	12	13	13	12	12,5
	R = 5D	20	22	22	21	21,2
MÉDIA	R = 3D	19,4	17,6	17,5	13,5	18,74
	R = 5D	28,6	28	27	22,5	28,26

A análise dos valores das forças atuantes no ponto médio das curvas mostrou que estes foram diretamente proporcionais às velocidades de escoamento. Quanto maior a velocidade de escoamento, maior a magnitude da força atuante.

A substituição das curvas de raio igual a 1D por curvas de raio 3D e 5D permitiu uma redução média dos valores das forças atuantes na ordem de 18,74% e 30,7%, respectivamente, como informado na Tabela 33.

Observou-se também uma diminuição da taxa de redução das forças atuantes com o aumento da velocidade de escoamento, ou seja, quanto maior a velocidade, menor o efeito do aumento do raio na redução dos esforços atuantes nas curvas.

A análise dos resultados referentes às frações de fase presentes no escoamento mostrou que à variação das frações tiveram pouca influência na magnitude das forças atuantes no ponto médio das curvas.

As forças atuantes no ponto médio das curvas podem ser visualizadas na Figura 21.

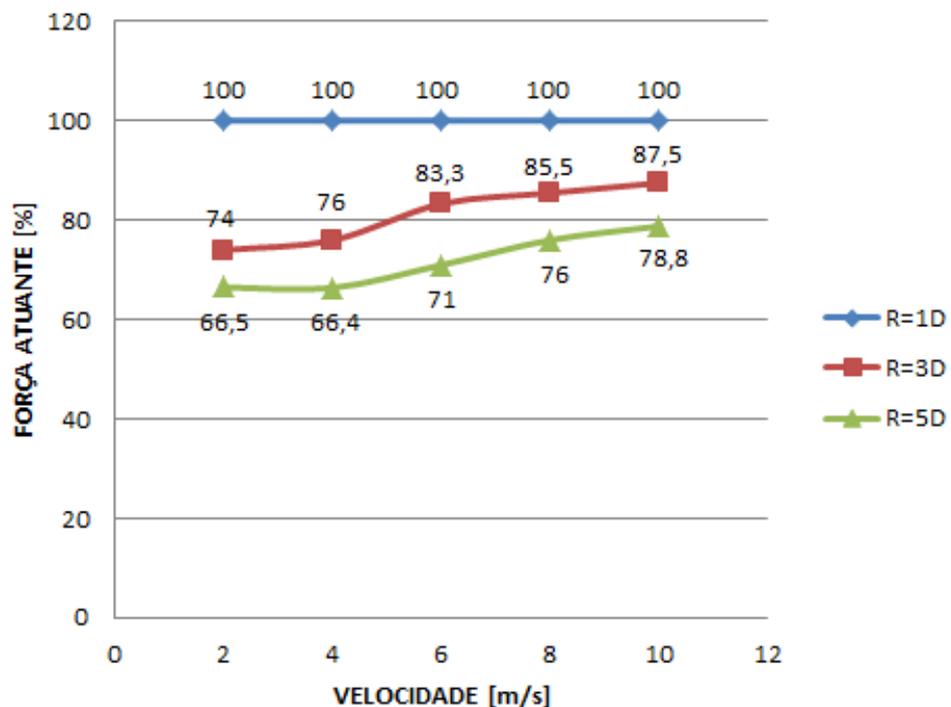


Figura 21: Forças atuantes no ponto médio das curvas.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões referentes à análise estática

Os resultados obtidos na análise estática possibilitaram as seguintes conclusões:

#### a) Tensão atuante tubulação:

Redução média das tensões: 14,77% (R = 3D); 7,41% (R = 5D).

Para os casos de operação, sustentação e expansão analisados, as tensões atuantes equivaleram a 2,8%, 1,2% e 2,7% da tensão admissível, respectivamente. Os baixos valores das tensões atuantes deveram-se a baixa pressão e temperatura utilizadas na simulação. Os maiores valores das tensões para os casos operação e expansão, comparativamente ao caso sustentação, mostrou a forte influência da temperatura na elevação das tensões. Quanto maior a temperatura, maior à expansão térmica e conseqüentemente, maior o nível de tensão na tubulação.

A análise dos valores das tensões atuantes permitiu também detectar uma tendência de diminuição de suas magnitudes com o aumento do raio da curva. Para os casos de operação, sustentação e expansão, ocorreram para as curvas com raio 3D uma redução das tensões de 12,33%, 21% e 11%, e para às curvas com raio 5D às reduções foram de 7,33%, 9,2% e 5,7%, respectivamente. Observou-se que à redução média das tensões para curvas de raio igual a 5D (7,41%) foi inferior à redução apresentada para curvas de raio 3D (14,77%).

A adoção de curvas fabricadas com raios de curvatura maior que 3D tende a reduzir o nível de tensão da tubulação, devendo ser analisada para cada caso, durante a fase de projeto, principalmente para tubulações submetidas a elevadas pressões e temperaturas.

#### b) Esforços atuantes nas restrições, deslocamentos e forças atuantes nas curvas:

A análise dos resultados obtidos referentes às demais propriedades permitiu afirmar que os esforços atuantes nas restrições, os deslocamentos e forças atuantes nas curvas foram pouco influenciados pela substituição das curvas de

raio 1D por curvas de raio 3D e 5D, não constituindo uma solução eficiente para minimização do nível de sollicitação estática da tubulação.

**Esforços atuantes nas restrições:**

Variação média dos esforços: +0,03% (R = 3D); -0,16% (R = 5D).

(Aumento médio de 0,03% nas curvas de raio 3D e redução de 0,16% nas curvas de raio 5D).

**Força atuante no ponto médio das curvas:**

Variação das forças atuantes: +0,07% (R = 3D); -2,44% (R = 5D).

(Aumento médio de 0,07% para as curvas de raio 3D e redução média de 2,44% para curvas raio 5D).

**Deslocamento do ponto médio das curvas:**

Os deslocamentos dos pontos médios das curvas foram insignificantes, conforme mostrado na Tabela 11. Mesmo se tratando de pequenos valores, alguns percentuais apresentaram grande amplitude de variação, distorcendo os valores médios calculados. Devido ao fato exposto, optou-se pela não apresentação dos valores médios.

## **5.2 Conclusões referentes à análise dinâmica**

a) De forma geral, os resultados obtidos nas análises dinâmicas mostraram que às tubulações submetidas ao escoamento bifásico no padrão pistonado tiveram seu nível de sollicitação dinâmica minimizado à medida que se aumentou o raio das curvas. As propriedades analisadas apresentaram as seguintes reduções:

**Tensão atuante na tubulação:**

Redução média das tensões: 34,5% (R = 3D); 44% (R = 5D).

**Esforços atuantes nas restrições:**

Redução média dos esforços: 18,85 % (R = 3D); 29 % (R = 5D).

**Deslocamento do ponto médio das curvas:**

Redução média dos deslocamentos: 19,52 % (R = 3D); 30,7 % (R = 5D).

### **Força atuante no ponto médio das curvas:**

Redução média das forças: 18,74 % (R = 3D); 28,26 % (R = 5D).

b) A redução da magnitude das propriedades avaliadas representou uma redução das solicitações dinâmicas impostas à tubulação, que pode ser traduzida pela redução do nível de vibração da tubulação.

c) As taxas de redução média das propriedades analisadas foram mais significativas para baixas velocidades, em torno de 2 m/s e 4 m/s. Os perfis ascendentes das curvas indicam que quanto maior a velocidade, maior o nível das solicitações dinâmicas impostas à tubulação.

d) Observou-se também que o efeito do aumento do raio da curva de 3D para 5D foi mais significativo no ponto médio da curva representativa, que correspondeu uma velocidade em torno de 6 m/s. Notou-se que a medida que se aumentou a velocidade de escoamento, ocorreu uma diminuição do valor das taxas de redução das propriedades analisadas, em função do aumento do raio da curva.

e) Para as quatro propriedades analisadas, não ocorreram variações significativas de suas magnitudes em função da variação das frações de fase. Acredita-se que este comportamento deveu-se a não variação do comprimento do pistão de líquido, que foi mantido fixo, com um comprimento arbitrado de 10D.

f) Os valores das frequências naturais de vibração sofreram pouca variação para os três arranjos de tubulação propostos, que consideraram curvas de diferentes raios. A menor frequência obtida no primeiro modo de vibração foi de 12,43 Hz, bem acima dos valores mínimos recomendados para linhas conectadas a equipamentos rotativos e alternativos, que são 2 Hz e 5 Hz, respectivamente.

### **5.3 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES**

Visando a continuidade do trabalho, sugere-se:

a) Criar de um modelo experimental de bancada, equivalente ao modelo teórico, com objetivo de confrontar os resultados obtidos.

b) No experimento de bancada, acoplar uma bomba centrífuga a um motor com inversor de frequência garantiria a vazão de líquido para todos os cenários propostos. Um compressor garantiria o suprimento de ar. Para aferição das vazões, instrumentos com range de medição adequado aos volumes deslocados, correspondente a cada cenário avaliado, seriam utilizados. Para medição da vibração e força atuante nas curvas, acelerômetros e transdutores seriam instalados nas curvas.

c) Considerando que no presente estudo o comprimento do pistão de líquido foi arbitrado, sugere-se acoplar à tubulação estações de medição instrumentadas, de forma que possibilite a determinação das principais características do escoamento, tal como o comprimento do pistão de líquido e velocidade das fases e, posteriormente, o tratamento estatístico dos resultados coletados.

d) Outras técnicas de análise poderiam ser utilizadas para visualização do padrão de escoamento, citando como exemplo a técnica de ultrason, *Wire-mash* ou filmagem em alta velocidade.

e) Os resultados obtidos pelos métodos propostos poderão ainda ser comparados com os resultados obtidos em programas de fluidodinâmica computacional, como o modelo *slug-tracking*.

f) A utilização de curvas fabricadas no campo ou oficinas (*pipeshop*), apresenta maior viabilidade em tubulações de pequeno diâmetro, igual ou menor 1½" (38 mm), devido à facilidade de dobramento dos tubos. Para tubulações de maior diâmetro, a proposta de aumento do raio das curvas deve ser analisada e utilizada sem restrições, sendo o código de projeto aplicado e o custo de fabricação os fatores a serem considerados.

g) Uma alternativa simples de projeto, a ser considerada em uma fase anterior à adoção de procedimentos mais complexos de redução de vibração em tubulações que apresentam o escoamento no padrão pistonado, consiste na adequação do diâmetro nominal da tubulação e, conseqüentemente, das velocidades superficiais de escoamento das fases, de forma que haja alteração do padrão pistonado para padrão que apresentam continuidade das fases, citando como exemplo o padrão

estratificado. Para adequação dos diâmetros utiliza-se um mapa de escoamento compatível com os fluidos conduzidos e a posição de montagem da tubulação. Qualquer alteração de diâmetro de tubulação deve ser validada pela equipe de processo.

## REFERÊNCIAS

- ADAMI, D. S.; **Análise Vibratória em Tubulações de Fluxo Bifásico**. 2011, 28 p., Monografia de conclusão de curso - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2011.
- BAKER, D.; **Simultaneous Flow of Oil and Gas**. Oil and Gas Journal, 1954, 53 p.
- BRUNET, F.; **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- BARBOSA FILHO, F. E. V.; **Estudo do escoamento Bifásico Padrão Golfada de Líquido na Transição Vertical Ascendente – Horizontal Utilizando um Modelo Slug – Tracking**. 2011, 161p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2011.
- BARNEA D.; SHOHAM O.; TAITEL .; **Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two Phase Flow; Horizontal to Vertical**, Chem. Eng. Sci., 37, 735-740, 1982.
- Dynamic Analysis of Water Hammer Loads.
- FRANÇA FILHO, J. L.; **Análise de Tensões de Tubulações Industriais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 2013.
- GEMPRO, Análise de tensão estática e dinâmica de tubulação.
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE; **Report on the Hydrocarbon Release Incident Investigation Project - 1/4/2000 to 31/3/2001**. Offshore Technology Report 2001/055.
- HELOUI, I. X. A.; **Vibrações e Esforços Dinâmicos em Tubulações Induzidos pelo Escoamento Bifásico**. 2008, 81 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, 2008.
- HUBBARD, M. B; DUKLER, A. E.; **The Characterization of Flow Regimes For Horizontal - Two Phases Flow**. Proceedings of the 1996 Heat Trans & Fluid Mech. Inst. Stanford, 1996.
- MACDONALD, R. W. F.; **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.

MANDHANE, J.M.; GREGORY, G.A.; AZIZ, K.; 1974. **A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes**. International Journal of Multiphase Flow 1, 537-553, 1974

MATHIAS, M. H.; **Ferramentas de Diagnósticos de Máquinas**. Sistema de Diagnóstico em Máquinas. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Programa de Pós Graduação em Mecânica.

NUCLEAR ENERGY AGENCY - ECD/NEA **Pipe Failure Data Exchange - (OPDE) – Project**. NEA/CSNI/R (2009)19, 2009.

Ofuchi, C. Y.; **Técnicas Avançadas para Análise do escoamento Bifásico Gás – Líquido em Golfadas**, Curitiba: UTFPA, 2011, 80 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Técnica Federal do Paraná, 2009.

PETALAS, N.; AZIZ, K.; **A Mechanistic Model for Multiphase Flow in Pipes**. The 49<sup>th</sup> Ann. Tech. Meeting Petroleum Society, 8.10 June, Calgary, Canada, 1998.

PETROBRÁS/E&P-BC/GELOG/GEOFI/GMAN. **Curso de Vibração**. Macaé,RJ, 2000.

Pessanha, V. G.; **Estudo de Vibração Induzida por Escoamento Interno em um Sistema Pipeline-Riser**, Rio de Janeiro, UFRJ, 2014, 98 p. Projeto de Graduação, Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

RIVERIN, J. L.; LANGRE, E.; PETTIGREW, M. J.; **Fluctuating Forces Caused By Internal Two-Phase Flow on Bends And Tees**. Journal of Sound and Vibration. Vol. 298, pp 1088-1098, 2006.

RIVERIN, J. L.; PETTIGREW, M. J.; **Vibration Excitation Forces due to Two-Phase Flow in Piping Elements**. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 129, 2007.

RAEDER, T. S. A.; **Estudo Experimental de Esforços Dinâmicos em Tubulações com Escoamento Bifásico**. Niterói: UFF, 2012. 90 p. Dissertação

(Mestrado) – Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, 2012.

RODRIGUES, H. T.; **Simulação Numérica de Escoamento Bifásico Gás – Líquido no Padrão Golfadas Utilizando o Modelo Lagrangeano de Segmento de Pistões**. Curitiba: UTFPA, 2009. 195 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Técnica Federal do Paraná, 2009.

RAO, S. S.; **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

Souza, R. G. S.; **Escoamento Bifásico Líquido-Gás: Previsão de Gradientes de Pressão com a Correlação de Lockhart & Martinelli e Fluidodinâmica Computacional**, Rio de Janeiro, UFRJ, 2009, 87 p. Projeto Final de Curso (Graduação), Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola de Química, 2009.

STREETER, V. L.; WILIE, E. B.; **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1982.

TAITEL, Y.; BARNEA, D.; DUKLER, A. E.; **Modeling Flow Pattern Transitions For Steady Upward Gas – Liquid Flow In Vertical Tubes**, AICH J.26, 345-354, 1980.

TELLES, P. C. S.; **Tubulações Industriais - Cálculo**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME. **Boiler and Pressure Pipe**, ASME B31, 2008.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME. **Process Piping**, ASME B31.3, 2008.