

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

RAPHAEL LAQUINI

ESCOAMENTO DE GÁS ÚMIDO EM GEOMETRIA COM EXPANSÃO 3:2

VITÓRIA
2014

RAPHAEL LAQUINI

ESCOAMENTO DE GÁS ÚMIDO EM GEOMETRIA COM EXPANSÃO 3:2

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Márcio Ferreira Martins, *Ph. D.*

Coorientador: Prof. Marcelo Camargo S. de Macedo, *Dr.*

VITÓRIA

2014

RAPHAEL LAQUINI

ESCOAMENTO DE GÁS ÚMIDO EM GEOMETRIA COM EXPANSÃO 3:2

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 19 de Dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Márcio Ferreira Martins, *Ph. D.*
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Marcelo Camargo S. de Macedo, *Dr.*
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Rogério Ramos, *Dr.*
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Bruno Furtado de Moura, *M. Sc.*
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família.

A todos que direta e indiretamente ajudaram na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Em aplicações industriais o escoamento multifásico é comumente observado e conseqüentemente seu entendimento torna-se essencial para projetos, instrumentos e controladores de plantas. Este tipo de escoamento pode apresentar variadas formas de regime de escoamento que variam com a fração de volume e velocidade de cada fase, além da posição que a geometria está disposta – horizontal, vertical ou inclinado.

Um dos fluxos multifásicos mais comuns é denominado de gás úmido e largamente encontrado nas produções de gás natural. Este é caracterizado como um escoamento bifásico gás-líquido no qual a fração de volume de gás é superior a 95%.

O trabalho subsequente fez a análise do comportamento de uma pequena fração de água de um gás úmido em um escoamento que passa por uma tubulação que possui uma expansão de área da seção transversal da ordem de 3:2. Para tal análise foi usado uma simulação CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional – através do *software* ANSYS FLUENT utilizando-se de uma abordagem Euleriana-Euleriana por meio de um modelo de Mistura e um modelo de turbulência k- ϵ padrão.

Os resultados desta simulação teve como objetivo validar os modelos através da comparação com padrões sugeridos por diagramas de escoamento bifásico gás-líquido. Além disso foi proposto um estudo aprofundado em possíveis problemas de corrosão envolvendo as condições do problema estudado uma vez que os resultados mostraram um acúmulo constante de líquido em uma região da geometria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de escoamento multifásico em tubulações verticais [3].....	12
Figura 2 – Mapa de escoamento multifásico em tubulações horizontais [3]	13
Figura 3 – Geometria analisada	22
Figura 4 – Detalhe da malha na entrada da geometria	25
Figura 5 – Detalhe da malha no trecho de expansão.....	25
Figura 6 – Detalhe da malha na saída da geometria.....	26
Figura 7 – Geometria da simulação prévia de diâmetro $d=97,18\text{mm}$	27
Figura 8 – Malha gerada para a simulação de validação	27
Figura 9 – Variação de densidade na seção transversal do comprimento $5d$	31
Figura 10 – Contornos de densidade na parte inferior do tubo	31
Figura 11 – Contornos de densidade na parte superior do tubo	32
Figura 12 – Perfil de Velocidade de na seção transversal do comprimento $5d$	32
Figura 13 – Contornos das velocidades em X do escoamento da mistura.....	33
Figura 14 – Variação de densidade da seção transversal na entrada da expansão .	34
Figura 15 – Variação de densidade da seção transversal na metade da expansão .	34
Figura 16 – Variação de densidade da seção transversal da saída da expansão.....	35
Figura 17 – Marcações das condições de entrada e saída da expansão no mapa de escoamento multifásico [8; Adaptado].....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões da geometria analisada	23
Tabela 2 – Propriedades da água	23
Tabela 3 – Composição do gás natural seco utilizado	24
Tabela 4 – Propriedades do gás natural seco	24
Tabela 5 – Número de nós e elementos da malha gerada para a simulação na geometria com expansão	25
Tabela 6 – Número de nós e elementos da malha da simulação de validação.....	27
Tabela 7 – Condições de entrada na simulação de validação	29
Tabela 8 – Vazões volumétricas de gás e de água.....	29
Tabela 9 – Velocidades superficiais de entrada e saída da expansão.....	36

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	9
2 - ESTADO DA ARTE	10
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1 Escoamento Multifásico	11
3.2 Modelos Numéricos de Escoamento Multifásico	13
3.2.1 A Abordagem Euleriana-Euleriana	14
3.3 Modelo Numérico de Mistura	15
3.3.1 A Equação da Continuidade	15
3.3.2 A Equação da Quantidade de Movimento	16
3.3.3 A Equação da Energia.....	17
3.3.4 A Equação das Velocidades Relativas	17
3.3.5 A Equação das Frações de Volume	18
3.4 Modelo de Turbulência.....	18
3.4.1 Modelo k- ϵ Padrão.....	20
4 - FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	22
4.1 O Problema Físico.....	22
4.2 As Fases Envolvidas	23
4.3 Modelo Geométrico	24
4.4 Simulação de Validação do Modelo de Mistura	26
5 - CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	28
5.1 Condições do Modelo.....	28
5.2 Condições de Entrada e Saída	28
5.3 Condições de Parede.....	29
6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	38
8 - BIBLIOGRAFIA	40

1 - INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética pós-revolução industrial, associado ao desenvolvimento de técnicas de perfuração cada vez mais sofisticadas, fez com que o petróleo se tornasse a principal matriz energética global. escoamentos multifásicos são comumente encontrados na produção de petróleo e gás dado o projeto da planta de exploração ou por uma característica do próprio escoamento.

Na exploração de reservatórios de gás, pode ocorrer a formação de condensado devido à queda de pressão entre o reservatório e a tubulação. Além disso, a água é uma “impureza” que comumente está presente nos reservatórios. Assim, o estudo do escoamento multifásico torna-se essencial para o entendimento das diversas formas de escoamento encontrados neste tipo de indústria.

Com o conhecimento do comportamento do escoamento multifásico pode-se projetar instrumentos para o melhor controle da planta de produção e geometrias mais eficazes para o escoamento dos fluidos. Esses parâmetros tem suma importância uma vez que falhas nas tubulações, tanques e vasos de pressão devido a erros de projeto ou falha no controle podem acarretar em grandes perdas de produção, prejuízos financeiros, tragédias e desastres ambientais.

O presente trabalho visa o estudo de um escoamento multifásico utilizando simulação CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional – através de algoritmos e métodos numéricos no *software* comercial ANSYS FLUENT. O estudo consiste em modelar o escoamento de gás contendo água em uma tubulação horizontal que expande seu diâmetro através de uma redução excêntrica instalada de forma invertida ao escoamento, caracterizando uma expansão.

O objetivo do estudo é observar como a presença de uma pequena fração de água de um gás úmido atua junto à parede de uma geometria encontrada em uma plataforma offshore de produção de gás onde há uma expansão da seção transversal na escala de 3:2. Dado o resultado deste padrão de escoamento, faz-se necessário verificar os possíveis problemas que este pode causar na tubulação. Para se chegar a tal resultado foi necessário o estudo dos diferentes campos de escoamento, a definição de um modelo numérico mais adequado e a validação da escolha do mesmo.

2 - ESTADO DA ARTE

O escoamento bifásico é muito encontrado nos processos industriais, o que faz com que as pesquisas nesta área sejam comuns. Uma forma de escoamento bifásico denominado gás úmido são encontrados fortemente na produção de gás natural, portanto seu estudo é encontrado com frequência na literatura.

Um dos estudos mais encontrados na literatura envolvem a medição de vazão de gás úmido. He e Bai [1] fizeram um estudo de escoamento de gás úmido e relacionaram parâmetros de fração de líquido e pressão com a sobre leitura em medidores de vazão do tipo Venturi. Já Binoti [2] também fez uma análise de medição de vazão, só que para medidores do tipo cone invertido no qual analisava também a sobre leitura com a variação de parâmetros de velocidade do escoamento e pressão. Já Steven e Hall [3] desenvolveram uma correlação entre correções nas medições de vazão em placas de orifício de 2" e 4".

Outro tipo de estudo muito encontrado é relacionado a problemas que a produção de petróleo e gás pode provocar nas tubulações para que soluções sejam propostas. Wang, Yang e Zhu [4] desenvolveram uma análise de corrosão envolvendo o escoamento de gás natural com presença de H_2S , além de estudos do emprego de inibidores para estes casos. Já Zeng, Che e Liu [5] desenvolveram uma investigação experimental em tubulações verticais de escoamento bifásico gás-líquido com corrosão com CO_2 .

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Escoamento Multifásico

Segundo Brennem [6], o termo escoamento multifásico é usado para se referir a qualquer escoamento que possui mais de um componente ou fase. Esta definição, de maneira geral, consegue englobar qualquer escoamento que envolva duas ou mais fases. Estes escoamentos possuem padrões dependentes de variáveis como fração volumétrica ou velocidade das diferentes fases. Desta forma, Paladino [7], foi mais específico, e definiu um modelo multifásico como uma região do espaço onde coexistem dois ou mais fluídos imiscíveis separados por uma interface, podendo ser esta conexa ou desconexa ou uma combinação de ambos casos onde a mesma fase pode aparecer em forma contínua ou dispersa.

Entende-se por interface desconexa aquelas quando existe uma disparidade dimensional entre as fases, como em bolhas dispersas em líquidos. Porém, quando há uma semelhança entre as dimensões das fases a interface é dita conexa. A definição de Paladino [7] mostra a grande disparidade de fluxos multifásicos e a dificuldade de se trata-los de forma geral, uma vez que o comportamento do escoamento não varia apenas com as fases envolvidas no processo.

Em escoamentos bifásicos envolvendo fases líquidas e gasosas são comumente representados em mapas, tais como os mostrados nas Figuras 1 e 2 de forma qualitativa em função das velocidades superficiais de líquido ($v_{s,líq}$) e gás ($v_{s,gás}$). Esses parâmetros são definidos como as velocidades respectivas de líquido e de gás caso o fluxo fosse monofásico. Desta forma, a velocidade da mistura (v_m) é definida pela soma dessas velocidades.

$$v_{s,gás} = \frac{Q_{gás}}{A} \quad (3.1)$$

$$v_{s,líq} = \frac{Q_{líq}}{A} \quad (3.2)$$

$$v_m = v_{s,gás} + v_{s,líq} \quad (3.3)$$

No qual $Q_{gás}$ e $Q_{líq}$ são as vazões de gás e líquido, respectivamente, através de uma seção de área A .

Parâmetros físicos tais como as densidades das fases, as viscosidades, a tensão superficial, entre outros que podem afetar os regimes de fluxo não estão incluídos nos mapas das Figuras 1 e 2. A Figura 1 mostra os diferentes padrões para escoamentos verticais. É interessante notar, que a partir de um valor de velocidade superficial de gás todo escoamento será anular independente da velocidade superficial de líquido. Já a Figura 2 mostra os diferentes padrões para fluxos horizontais. Vale ressaltar que estes diagramas são representações qualitativas, ou seja, não é válido para condições específicas.

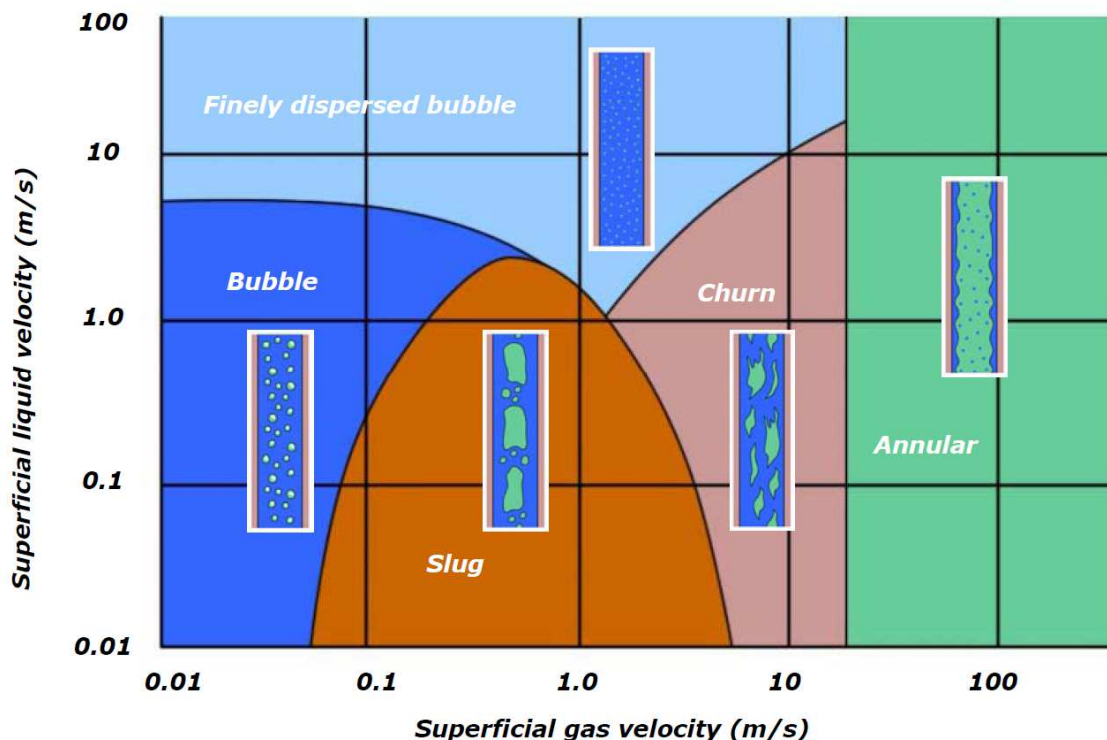


Figura 1 – Mapa de escoamento multifásico em tubulações verticais [8].

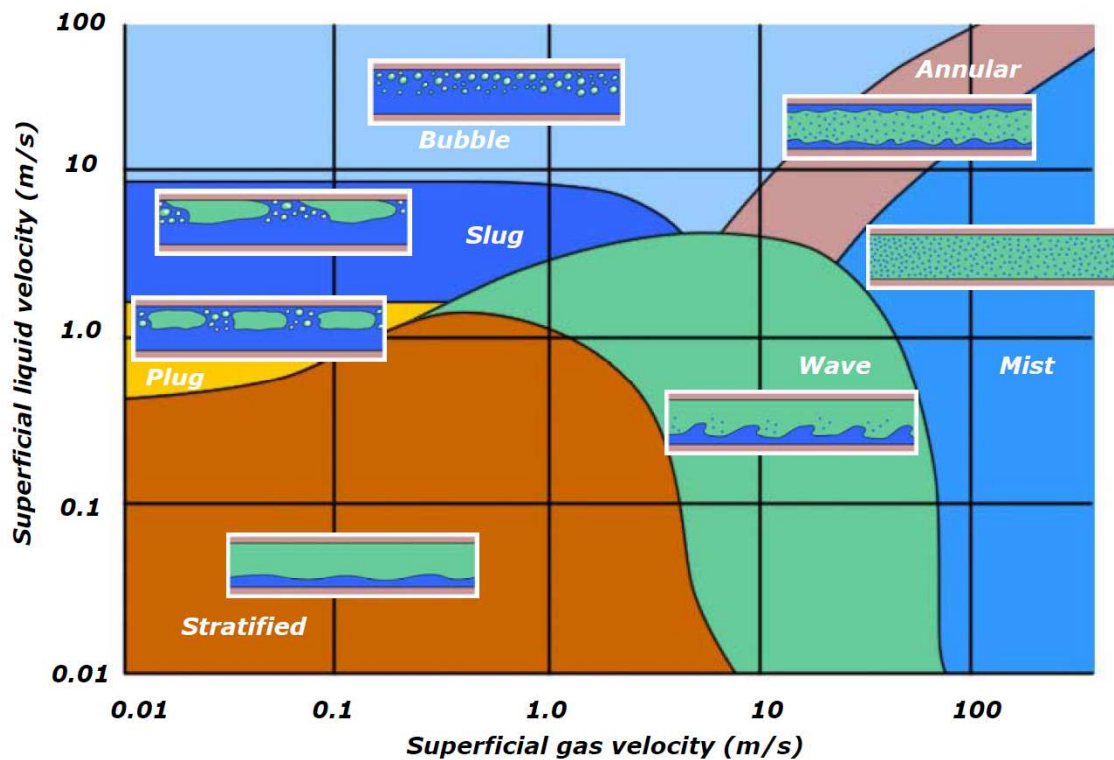


Figura 2 – Mapa de escoamento multifásico em tubulações horizontais [8].

Uma outra forma de se classificar escoamentos bifásicos é através da fração de volume de cada fase (α_k). Este método de classificação torna-se interessante para a seleção dos instrumentos de medição das variáveis deste fluxo. O projeto de um instrumento para operar com um fluxo composto predominantemente de líquido é significativamente diferente de um outro para operar com predominância de gás. Vale ressaltar que é classificado como gás úmido o fluido bifásico gás-líquido com frações de volume de gás superiores a 95%. A fração de volume de uma fase k (α_k) é obtida através da equação 3.4.

$$\alpha_k = \frac{\text{Volume da fase } k}{\text{Volume total}} \quad (3.4)$$

3.2 Modelos Numéricos de Escoamento Multifásico

Para a elaboração de modelos teóricos de escoamento podem ser utilizadas duas abordagens diferentes: Euleriana e Lagrangiana. A abordagem Euleriana baseia-se

na conservação da massa, energia e momento em volumes de controle definidos. Já a abordagem Lagrangiana baseia-se no acompanhamento individual das partículas e das interações entre elas por meio de equações algébricas.

Em escoamentos multifásicos há a necessidade interação entre as abordagens. As novas abordagens formadas são classificadas em dois grandes grupos: Euleriana-Euleriana e Euleriana-Lagrangiana. Esta, aplicada principalmente quando se há uma fase contínua (primária) e outra dispersa (secundária) e baseia-se na aplicação das equações de conservação da quantidade de movimento para cada partícula. Já na Euleriana-Euleriana tanto a fase contínua quanto dispersa são consideradas como meios contínuos e as equações desenvolvidas baseiam-se na conservação da massa, energia e momento acrescentando termos de interação entre as fases. A abordagem Euleriana-Euleriana será utilizada neste trabalho uma vez que, segundo Paladino [7], é ideal para escoamentos onde as fases estão misturadas e as velocidades relativas entre fases são consideráveis.

3.2.1 A Abordagem Euleriana-Euleriana

A abordagem Euleriana-Euleriana é a mais utilizada na literatura [1] [2] [7] [9]. No seu escopo há ainda mais três modelos diferentes: Volume de Fluido (VOF), Euleriano e Mistura. Este primeiro é utilizado quando se há dois ou mais fluidos imiscíveis que são resolvidos através da aplicação de um único conjunto de equações de momento no qual a fração volumétrica de cada fase é obtida para cada volume de controle do domínio.

O modelo Euleriano é indicado quando se há uma fase dispersa presente em uma fase contínua no qual uma única pressão é compartilhada para as fases. As equações da quantidade de movimento e conservação de massa são resolvidas para cada fase. Qualquer número de fases podem ser modelados desde que haja memória computacional suficiente. Além disso, o modelo não faz distinção entre escoamento multifásico fluido-fluido e fluido-sólido (granular).

Já o modelo de Mistura é derivado do Euleriano que pode ser usado quando as fases movem-se em diferentes velocidades, aplicando o conceito de deslizamento entre fases. As equações da quantidade de movimento, continuidade e energia são resolvidas para a mistura assim como no VOF. É usado tanto para escoamentos multifásicos granular e fluido-fluido. Pode ser aplicado como substituto para o modelo Euleriano em situações no qual as leis de interface são desconhecidas ou pouco confiáveis e para condições que as fases secundárias apresentam uma ampla distribuição. O modelo permite que as fases sejam interpenetrantes de forma que cada volume de controle do domínio possa apresentar uma fração volumétrica de 0 a 1 dependendo do espaço ocupado pela fase [10]. Este modelo foi adotado neste trabalho uma vez que o regime de escoamento é desconhecido e a fração da fase dispersa é muito baixa. A modelagem matemática deste modelo é descrita a seguir.

3.3 Modelo Numérico de Mistura

Como descrito anteriormente o modelo de Mistura pode ser aplicado para n fases onde resolve-se as equações da continuidade, da quantidade de movimento e da energia para a mistura, e as frações volumétricas e velocidades relativas – para casos em que há diferença de velocidade ou deslizamento entre as fases – para as fases secundárias.

3.3.1 A Equação da Continuidade

A equação da continuidade para a mistura é dada pela equação 3.5.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (3.5)$$

No qual \vec{v}_m é a velocidade média em massa da mistura.

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (3.6)$$

α_k é a fração volumétrica para cada fase k de um número n de fases. A massa específica (ρ_m) da mistura é obtida através da equação 3.7.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.7)$$

3.3.2 A Equação da Quantidade de Movimento

A equação da quantidade de movimento para a mistura, representada pela equação 3.8, pode ser obtida pela soma das equações da quantidade de movimento individuais para todas as fases.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \\ \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

No qual \vec{F} é força de corpo, \vec{g} é a aceleração da gravidade, p é a pressão manométrica, $\vec{v}_{dr,k}$ é a diferença de velocidade de uma fase k com relação a velocidade média da mistura que é representada pela equação 3.9.

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (3.9)$$

A viscosidade da mistura μ_m é obtida pela equação 3.10.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.10)$$

3.3.3 A Equação da Energia

A equação da energia é expressa pela equação 3.11.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k E_k \right) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p) \right) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3.11)$$

O termo $\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T)$ da equação representa a energia transferida por condução. No qual k_{eff} é condutividade efetiva.

$$k_{eff} = \sum_{k=1}^n \alpha_k (k_k + k_t) \quad (3.12)$$

No qual k_k é a condutividade de cada fase k e k_t é a condutividade térmica turbulenta que é definida de acordo com o modelo de turbulência utilizado. O termo S_E inclui todas as outras fontes de calor volumétricas. A energia E_k é obtida através da equação 3.13 para as fases compressíveis e da 3.14 para as fases incompressíveis

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (3.13)$$

$$E_k = h_k \quad (3.14)$$

No qual h_k é a entalpia sensível da fase k .

3.3.4 A Equação das Velocidades Relativas

A velocidade relativa (ou de deslizamento) de uma fase secundária p em relação a fase primária q é definida pela equação 3.15.

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (3.15)$$

A relação entre as velocidades \vec{v}_{pq} e $\vec{v}_{dr,p}$ é dada pela equação 3.16.

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \vec{v}_{qk} \quad (3.16)$$

No qual c_k é a fração mássica para qualquer fase k .

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (3.17)$$

3.3.5 A Equação da Fração de Volume

A equação da fração e volume de uma fase secundária p é obtida através da aplicação da continuidade para esta fase, como mostrado na equação 3.18.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (3.18)$$

3.4 Modelos de Turbulência

Segundo Fox, McDonald e Pritchard [11] um escoamento laminar é aquele no qual as partículas movem-se em camadas lisas, ou lâminas, e um escoamento turbulento é aquele que as partículas fluidas se misturam rapidamente, enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades. A presença desta flutuações aleatórias de velocidade e de alta frequência faz com a análise do escoamento turbulento seja bastante complexa.

Em vez disso, as equações instantâneas governantes (exatas) podem ser manipuladas de modo que se tenha menor custo computacional para resolução. Entretanto, o resultado desta manipulações contém variáveis adicionais. Desta forma, modelos de turbulência são empregados para determinar essas variáveis em termos conhecidos.

A proposta de Reynolds, chamada decomposição de Reynolds, desagregam as propriedades do escoamento em dois termos de modo a facilitar a resolução das equações. O escoamento turbulento pode então ser caracterizado como a soma do valor médio da propriedade com as suas respectivas flutuações.

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i(t) \quad (3.19)$$

É interessante destacar que mesmo que as propriedades variem em apenas uma ou duas dimensões as flutuações sempre variam tridimensionalmente. Substituindo as propriedades do escoamento conforme a proposta de Reynolds nas equações instantâneas da continuidade e do momento tem-se, respectivamente, as equações 3.20 e 3.21.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (3.21)$$

Estas equações possuem a mesma forma das equações de Navier-Stokes com as velocidades e outras variáveis expressas através da média de tempo. O termo δ_{ij} é o delta de Kronecker que é uma notação para a matriz identidade.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (3.22)$$

O termo $(-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)$ é definido como a tensão de Reynolds. A proposta de Boussinesq [9] relaciona a tensão de Reynolds com os gradientes de velocidade média.

$$-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - 2/3 \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3.23)$$

A hipótese de Boussinesq [14] é usada em alguns modelos de turbulência em FLEUNT. A vantagem desta abordagem é o relativo baixo custo computacional. A desvantagem é que assume-se que a viscosidade turbulenta (μ_t) é um valor escalar isotrópico o que não é rigorosamente verdade.

Um dos modelos que adotam a proposta de Boussinesq [12] é o modelo de turbulência k-ε padrão que foi utilizado no presente trabalho. Este modelo é consolidado e largamente utilizado em aplicações industriais.

3.4.1 Modelo k-ε Padrão

O modelo k-ε padrão foi proposto por Launder e Spalding [13]. Sua alta robustez, economia computacional e precisão razoável faz com que este seja largamente utilizado. Trata-se de um modelo semi-empírico baseado na adição de uma equação de transporte modelo para a energia cinética de turbulência (k) e outra para sua taxa de dissipação (ε) que são dadas, respectivamente, pelas equações 3.24 e 3.25.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \varepsilon - 2\rho \varepsilon M_t^2 + S_k \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + C_{3\varepsilon} \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.25)$$

Os termos S_k e S_ε são, respectivamente, termos fonte de energia cinética turbulenta e de sua dissipação. O valor de Pr_t padrão para este tipo de modelo de turbulência é 0,85 e β é o coeficiente de expansão térmica.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.26)$$

E M_t é o número de Mach definido pela equação 3.27.

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{c^2}} \quad (3.27)$$

No qual c é a velocidade local do som. A viscosidade turbulenta (μ_t) é computada pela combinação de k e ε .

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.28)$$

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, C_μ , σ_k e σ_ε são constantes:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (3.29)$$

4 - FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Para o problema em questão foi escolhida uma simulação bidimensional uma vez que a geometria adotada possibilitava esta escolha, pois trata-se de uma geometria simples e de simetria vertical. A escolha de um modelo bidimensional resulta num ganho de tempo computacional relevante quando se comparado a um modelo tridimensional. Isso ocorre pois o número de elementos necessários para se obter resultados razoavelmente precisos em uma malha 2D é expressivamente menor do que em um modelo 3D para se obter respostas de mesma precisão.

4.1 O Problema Físico

A geometria em questão consiste em um trecho reto horizontal de expansão de tubulação. As duas seções de tubulação foram dimensionadas para tubos 4" SCH 80 e 6" SCH 80, conforme a norma ASME B.36.10 [14]. Esta expansão de diâmetro das tubulações é realizada através de uma redução excêntrica, padrão ASME16.9 [15], instalada entre as tubulações. Como o escoamento flui do tubo menor para o maior, a redução atua como uma expansão. O dimensionamento da geometria descrita é mostrada pela Figura 3. As prolongações na entrada e saída da expansão são colocadas de forma que o escoamento entre em regime e forme um novo regime após a saída da expansão de comprimento H . Estes valores de cinco diâmetros foi obtido na simulação de validação. Vale ressaltar que estas dimensões correspondem a parte interna da tubulação são mostradas pela Tabela 1.

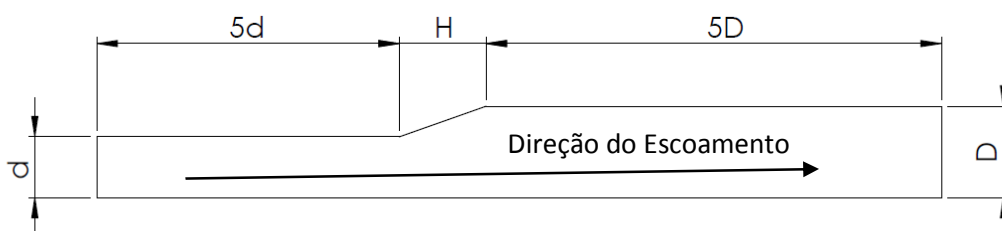


Figura 3 – Geometria analisada

Tabela 1 – Dimensões da geometria analisada

Parâmetro:	Dimensão (mm):
D	146,36
d	97,18
H	140

4.2 As Fases Envolvidas

O escoamento é formado por uma fase contínua de gás natural seco e outra dispersa de água líquida. As propriedades de massa específica e viscosidade da água são mostradas na Tabela 2. Entretanto, o gás natural é composto por uma mistura de componentes que forma uma única fase, além disso, existem gases naturais das mais diversas composições. Os componentes e sua respectiva fração molar do gás natural utilizado são mostrados pela Tabela 3. A partir da composição do gás e através do *software* UNISIM DESIGN R430 foi possível obter a massa específica e a viscosidade absoluta do gás natural seco. Estas propriedades que são mostradas através de Tabela 4, foram definidas para uma temperatura e pressão específica de operação de tubulações de gás de, respectivamente, 37,6 °C e 63,16 bar.

Tabela 2 – Propriedades da água

Massa Específica:	998,2 kg/m ³
Viscosidade Absoluta:	1,003 x 10 ⁻³ Pa.s

Tabela 3 – Composição do gás natural seco utilizado

Componente:	Fração Molar:
Metano – CH ₄	0,93656
Etano – C ₂ H ₆	0,02232
Propano – C ₃ H ₈	0,00998
Dióxido de Carbono – CO ₂	0,01866
Nitrogênio – N ₂	0,01248

Tabela 4 – Propriedades do gás natural seco

Massa Específica:	48,2 kg/m ³
Viscosidade Absoluta:	1,32 x 10 ⁻⁵ Pa.s

4.3 Modelo Geométrico

O presente trabalho consiste na simulação do escoamento de gás natural com presença de água na geometria descrita. O objetivo é verificar como a pequena fração de água atua nas proximidades da parede da expansão. A malha corresponde a todos os volumes de controle do fluxo. Portanto, para se ter uma melhor resolução do que ocorre na parede, a malha gerada foi feita de tal forma que os elementos próximos a parede receberam uma refinamento maior que no interior da geometria (Figuras 4, 5 e 6). A Tabela 5 mostra a quantidade de nós e elementos da malha gerada.

Tabela 5 – Número de nós e elementos da malha gerada para a simulação na geometria com expansão

Nós:	49687
Elementos:	49067

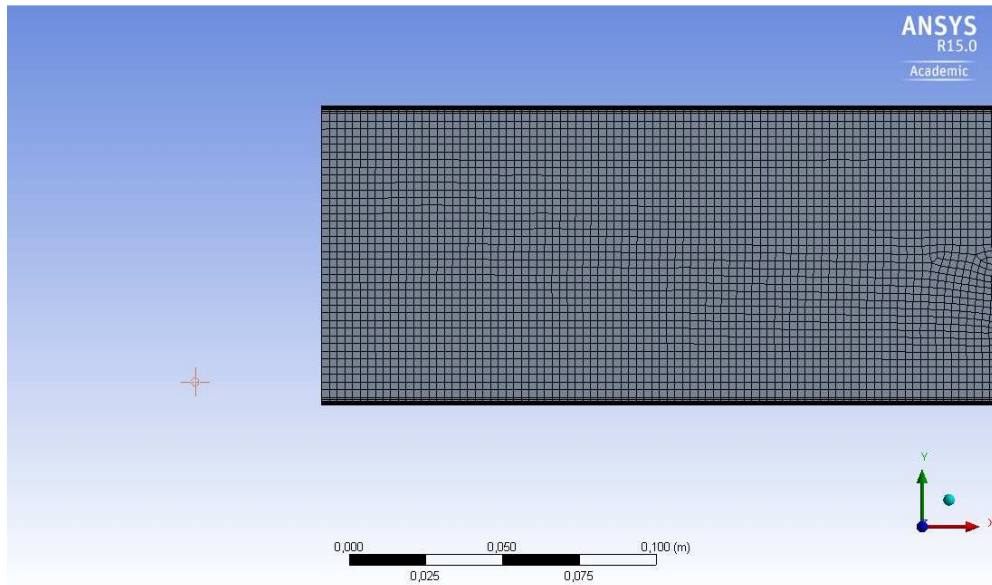


Figura 4 – Detalhe da malha na entrada da geometria

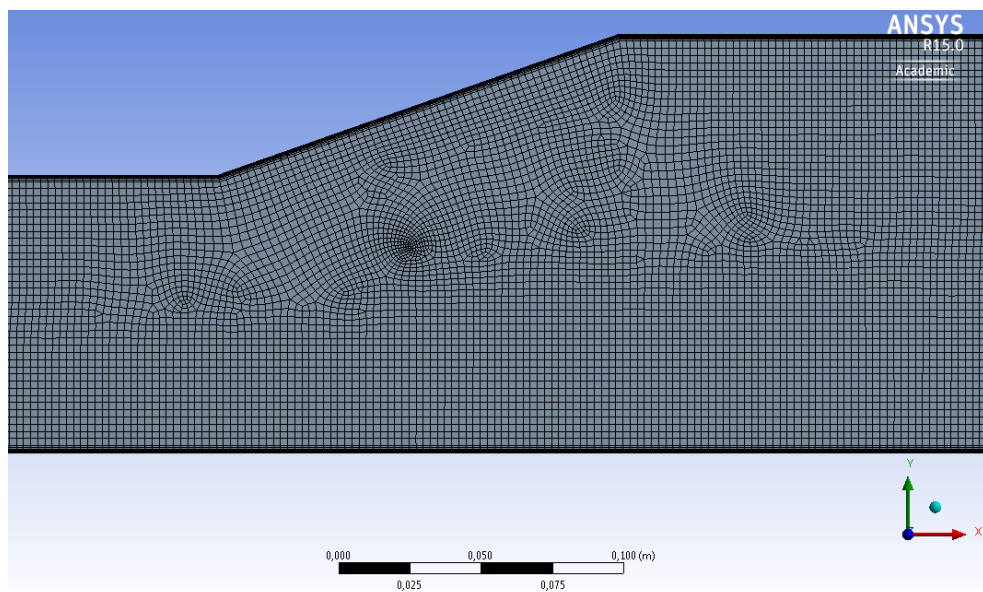


Figura 5 – Detalhe da malha no trecho de expansão

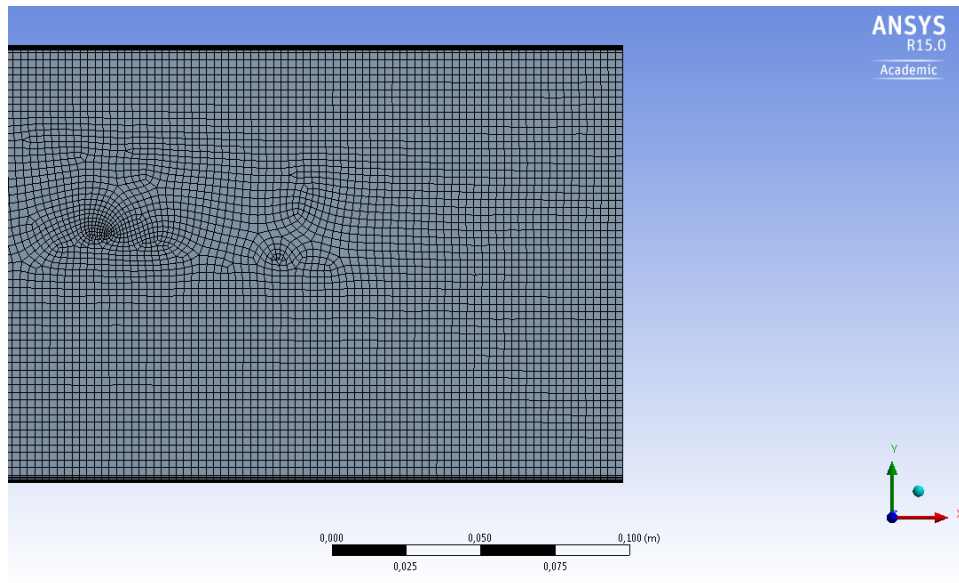


Figura 6 – Detalhe da malha na saída da geometria

4.4 Simulação de Validação do Modelo de Mistura

Antes da simulação da geometria descrita foi realizada uma simulação em um trecho reto horizontal de mesmo diâmetro da entrada da geometria de interesse. Esta simulação bidimensional possui o objetivo de verificar qual o comprimento necessário para que o escoamento forme um padrão de escoamento multifásico conforme aqueles mostrados no item 3 através da Figura 2.

O trecho reto utilizado para a validação corresponde a um tubo horizontal de 4" SCH 80 padrão ASME B.36.10 [11]. Como tentativa inicial colocou-se uma geometria de comprimento de vinte diâmetros de entrada conforme mostrado na Figura 7. Este diâmetro foi escolhido, uma vez que acreditava-se que neste comprimento formaria um dos padrões de escoamento. Como forma de garantir que o objetivo fosse cumprido poderia se prolongar a geometria em comprimentos bem maiores. Para uma geometria mais comprida seria necessário um número de elementos proporcionalmente maior, uma vez que fosse mantido o grau de refinamento, o que acarretaria num tempo de simulação maior.

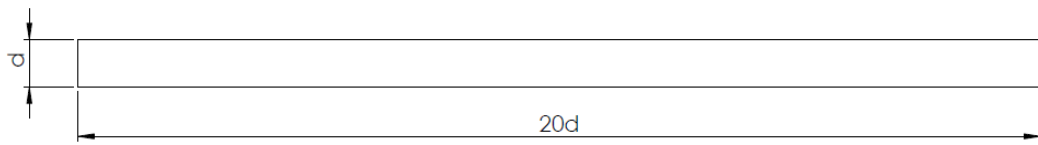


Figura 7 – Geometria da simulação prévia de diâmetro $d=97,18\text{mm}$

As fases envolvidas são as mesmas descritas no item 4.2 nas mesmas condições. Portanto, as propriedades desta simulação de validação correspondem a aqueles mostrados nas Tabelas 2, 3 e 4.

A malha construída para esta simulação é semelhante ao da mostrada no item 4.3. Portanto, novamente gerou-se uma malha com um refinamento maior nas proximidades das paredes da tubulação, como é mostrado na Figura 8. O número de nós e elementos são mostrados na Tabela 6.

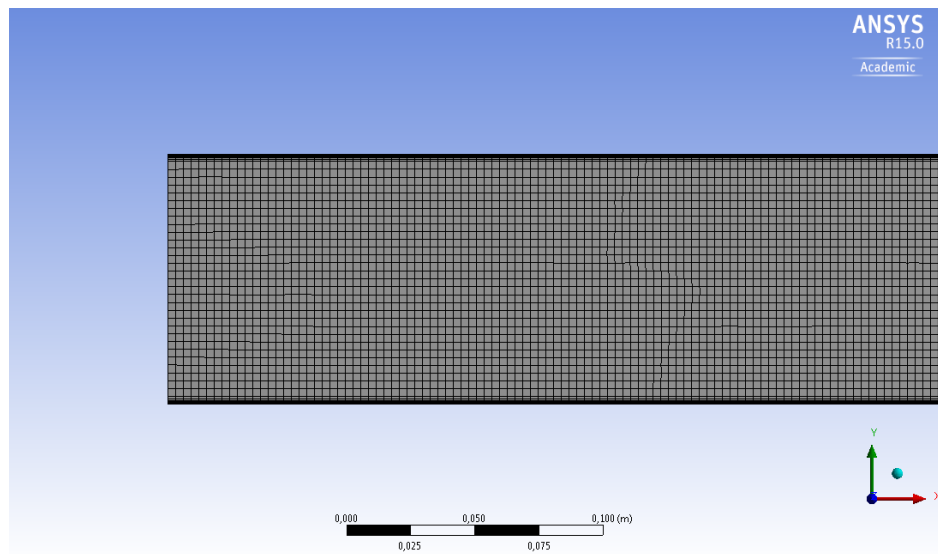


Figura 8 – Malha gerada para a simulação de validação

Tabela 6 – Número de nós e elementos da malha da simulação de validação

Nós:	46079
Elementos:	45360

5 - CONDIÇÕES DE CONTORNO

5.1 Condições do Modelo

O modelo multifásico escolhido como dito anteriormente foi o de Mistura. Neste modelo foi considerado que há deslizamento entre as fases além de termos de forças de corpo, uma vez que foi definido que haverá a presença da gravidade no escoamento. O modelo de turbulência foi definido como o k- ϵ padrão no qual suas constantes e funções são as mesmas definidas no item 3. Outro fator definido foi o diâmetro máximo da gotícula da fase secundárias. Como o objeto de estudo é o gás úmido, foi definido que o gás seco entrará na geometria como uma fase contínua e a água entrará na formas de gotículas de no máximo 10^{-5} m de diâmetro e, desta forma, assume-se que a entrada é de gás úmido.

5.2 Condições de Entrada e Saída

Para a simulação de validação assumiu-se o escoamento como turbulento, isotérmico, de propriedades (massa específica e viscosidade absoluta) constantes e com presença da aceleração da gravidade no sentido negativo da coordenada Y. A condição de entrada foi a de velocidade constante. Para o modelo de Mistura é necessário estabelecer as velocidades de entrada de cada uma das fases além de informar a razão de deslizamento entre eles. Estas condições estão na Tabela 7. Na saída da tubulação foi adotada uma pressão manométrica nula. Vale ressaltar que as propriedades dos fluidos foram admitidas como constantes ao longo do escoamento desta geometria, portanto o valor da pressão não influencia nas propriedades dos fluidos. Este valor de velocidade e fração volumétrica foram encontrados consultando-se as vazões diárias de gás e água de uma plataforma offshore que opera com a mesma pressão e temperatura utilizadas para se obter as propriedades de gás seco no item 4.2. As vazões de gás e água estão na Tabela 8.

Tabela 7 – Condições de entrada na simulação de validação

Velocidade de gás seco	18,2 m/s
Velocidade da água	18,2 m/s
Fração volumétrica de água	0,32%
Fator de deslizamento	10%

Tabela 8 – Vazões volumétricas de gás e de água

Vazão Volumétrica de Gás	11630 m ³ /dia
Vazão Volumétrica de Água	37,6 m ³ /dia

A velocidade de escoamento da mistura trabalhando-se as vazões diárias através da manipulação das equações 3.1, 3.2 e 3.3. Já a fração volumétrica foi obtido através da equação 3.4

Para o escoamento na simulação da geometria a ser estudada – que contém a expansão de seção de entrada – foi utilizada as mesmas condições de contorno de entrada e saída da simulação de validação, entretanto, o perfil velocidade obtido a através da simulação anterior foi adotado como a entrada de velocidade para ambas as fases. Este perfil é mostrado no item 6 através da Figura 12.

5.3 Condições de Parede

Em ambas as simulações as condições de adotadas foram a de parede estacionária e de não deslizamento na parede. Desta forma, todas as componentes de velocidade desta posição serão nulas.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como dito anteriormente o objetivo da simulação de validação é observar a partir de quantos diâmetros forma-se um padrão de escoamento multifásico. Ao se verificar o escoamento ao longo de toda a geometria observou-se que em um comprimento de cinco diâmetros do tubo, já havia uma concentração da água na parte inferior da geometria, caracterizando um perfil estratificado. Este padrão pode ser verificado no gráfico mostrado pela Figura 9. Nele é possível observar no eixo X a densidade do escoamento numa seção da tubulação traçada em $5d$ de comprimento, e no eixo Y é mostrado a própria coordenada Y da geometria, onde o valor máximo de Y corresponde ao diâmetro do tubo. Pela variação da densidade observa-se que na parte inferior da geometria a água – massa específica de $998,2 \text{ kg/m}^3$ – ficou concentrada e no restante da seção ficou constituído de gás seco – massa específica é de $48,2 \text{ kg/m}^3$. Isto também pode ser verificado ao observar os contornos de densidade na parte inferior (Figura 10) e na parte superior (Figura 11). Nesta mesma seção transversal foi observado o perfil de velocidade, que é mostrado pela Figura 12. Este perfil foi exportado para que pudesse ser utilizado como condição de entrada na simulação da geometria caracterizada pela expansão de seção transversal.

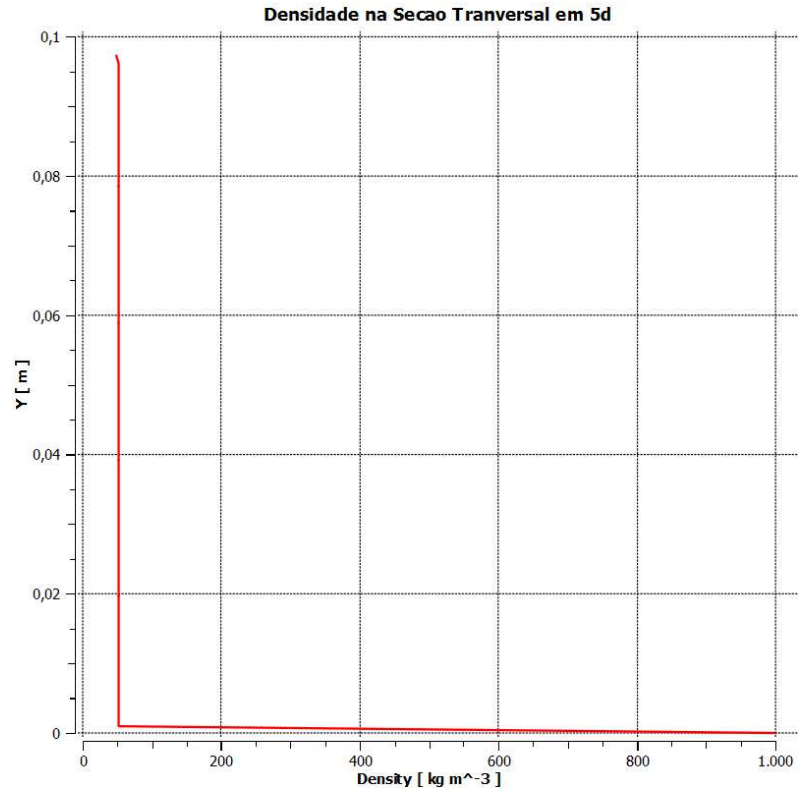


Figura 9 – Variação de densidade na seção transversal do comprimento 5d

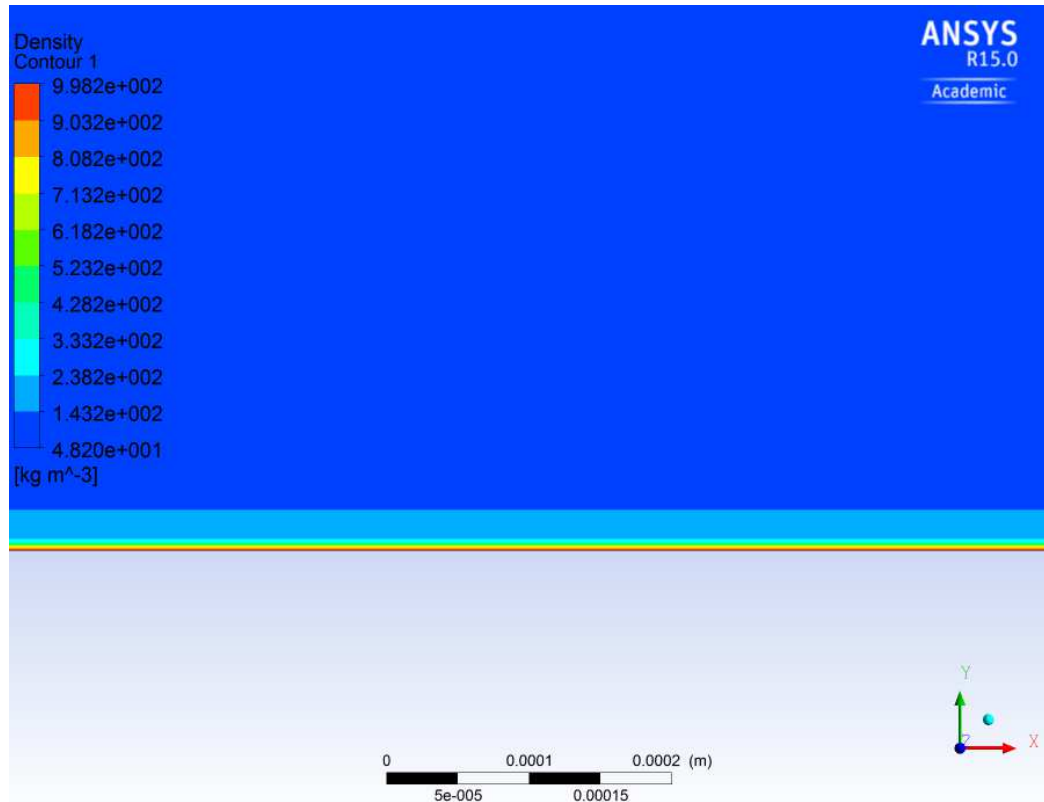


Figura 10 – Contornos de densidade na parte inferior do tubo

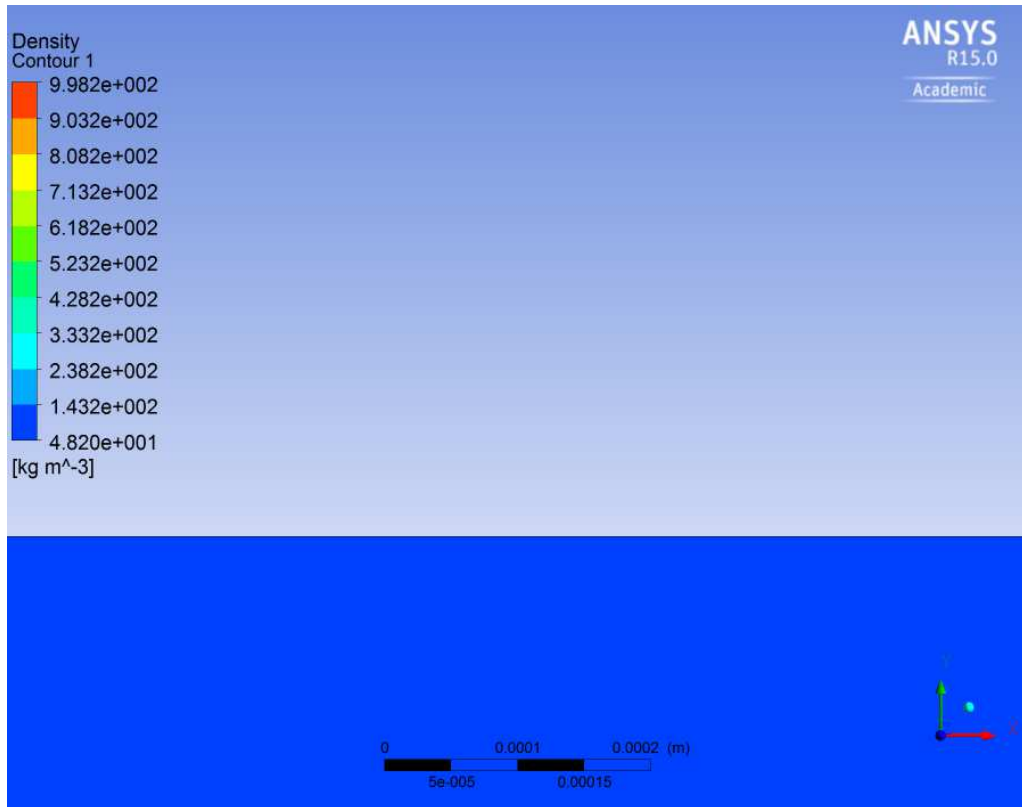


Figura 11 – Contornos de densidade na parte superior do tubo

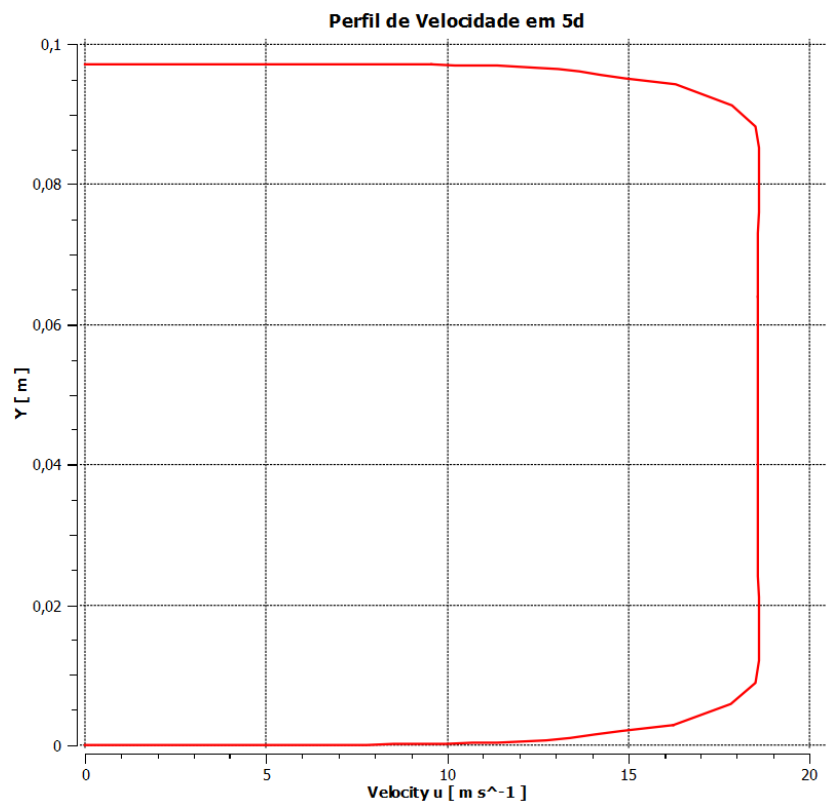


Figura 12 – Perfil de Velocidade de na seção transversal do comprimento 5d

Para a simulação da geometria de interesse pode-se observar os contornos de velocidade devido à expansão como mostrado na Figura 13. Além disso, como o objetivo deste trabalho é observar como a pequena fração de água atua nas paredes ao se passar por uma expansão 3:2, foi traçado uma seção na entrada, uma na metade do comprimento e outra na saída. Nestas seções foram construídos os gráficos mostrados pelas Figura 14, 15 e 16. Nestes gráficos assim como na Figura 9 são mostrados a densidade *versus* a dimensão Y da seção.

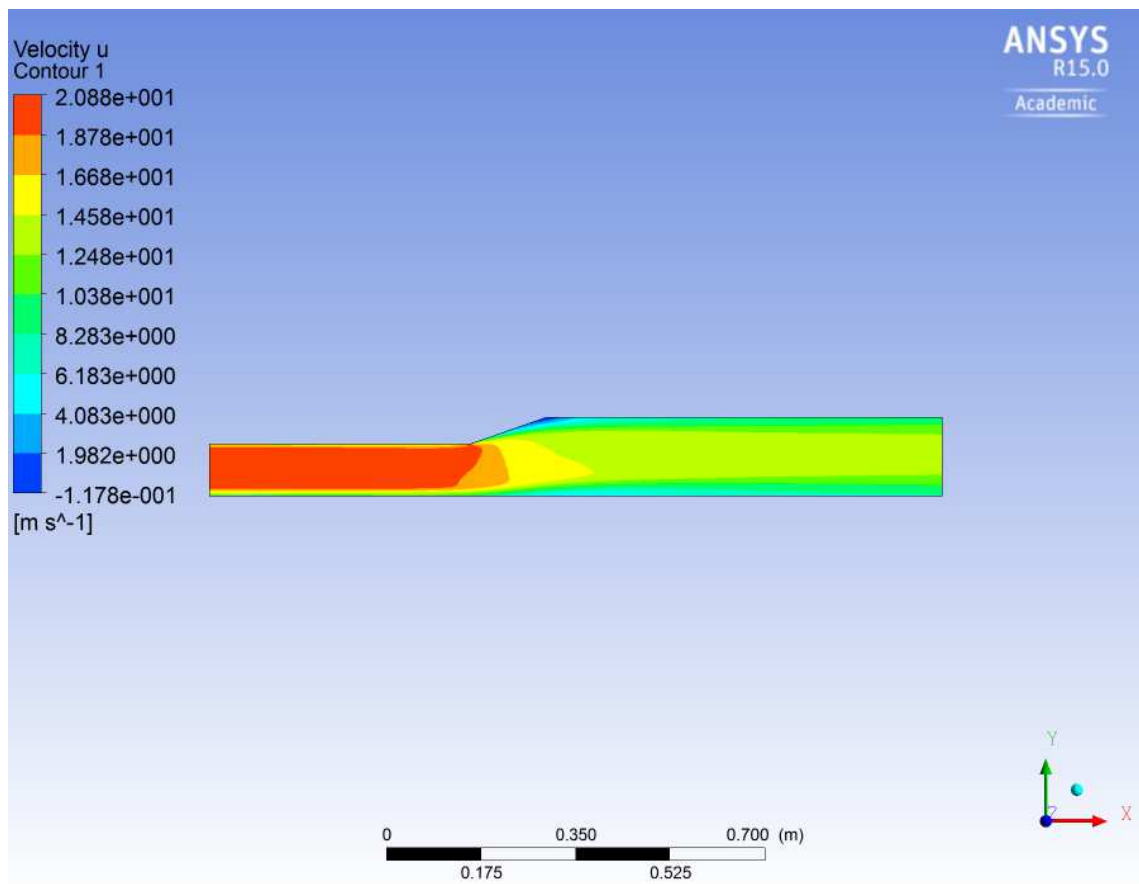


Figura 13 – Contornos das velocidades em X do escoamento da mistura

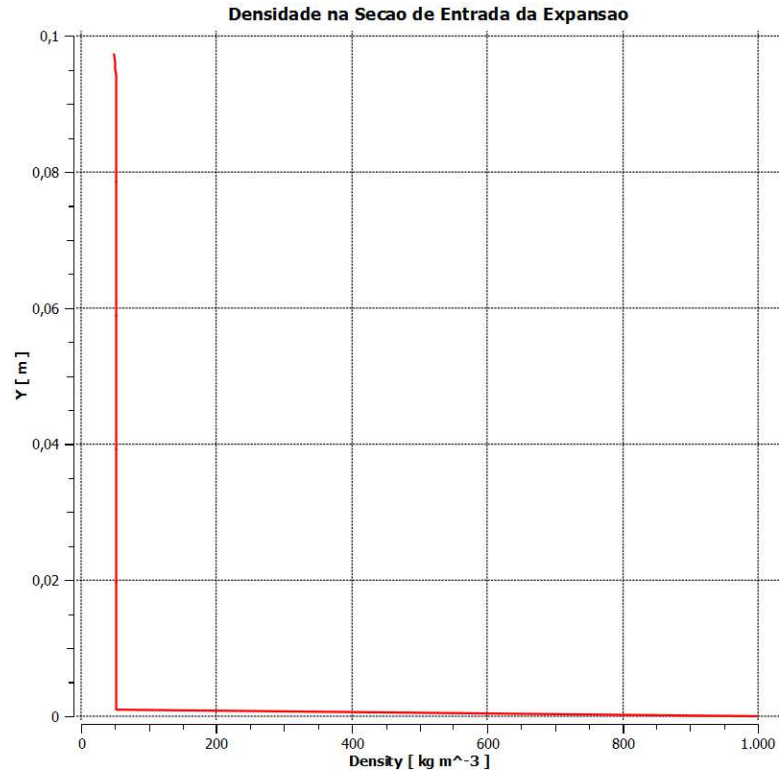


Figura 14 – Variação de densidade da seção transversal na entrada da expansão

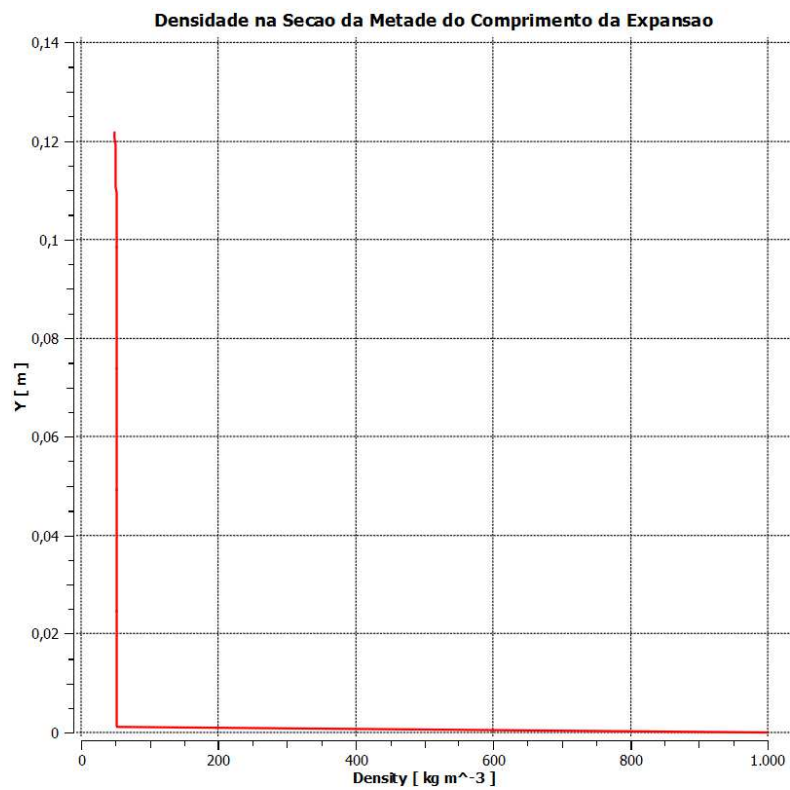


Figura 15 – Variação de densidade da seção transversal na metade da expansão

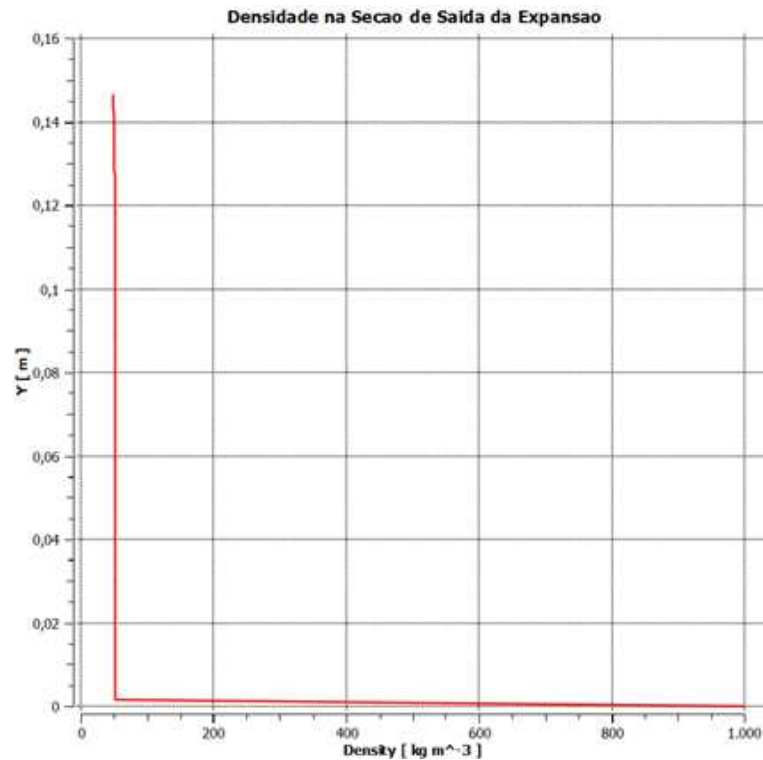


Figura 16 – Variação de densidade da seção transversal na saída da expansão

É nítido observar pela Figura 13, que ao longo da expansão haverá uma queda da velocidade de escoamento. Isso era esperado, uma vez que há uma expansão da área da seção transversal e dada que a vazão volumétrica é constante ao longo da geometria. Portanto, a velocidade média de escoamento cai com o aumento da área.

Do ponto de vista das densidades, pode-se observar que não há mudanças visíveis no padrão de escoamento, ou seja, independentemente da expansão não há mudança no regime de escoamento que consiste na formação de um película na parte inferior da geometria que não chega a 0,001 m de espessura. Através do mapa de padrões de escoamentos multifásicos horizontais representado no item 3 pela Figura 2 e utilizando das equações 3.1 e 3.2 é possível marcar os pontos no mapa que representam a entrada e saída da expansão no mapa. Os valores das velocidades superficiais para a entrada e a saída são representados pela Tabela 9.

Tabela 9 – Velocidades superficiais de entrada e saída da expansão

	Gás Seco	Água líquida
$v_{s,ent}$	18,15	0,05
$v_{s,sai}$	8,00	0,03

As marcações no diagrama de padrões de escoamento são mostradas na Figura 17. Ressalta-se que neste mapa as representações são qualitativas, ou seja, não é válido para condições específicas. Entretanto, mesmo que o digrama não possa ser utilizado como referência de definição de padrão de escoamento, é possível através dele se ter uma noção dos regimes de escoamento bifásico possíveis para uma determinada aplicação. Por exemplo, em condições que se há um valor de $v_{s,gás}$ muito menor que o valor de $v_{s,líq}$ provavelmente o escoamento apresentará um padrão de escoamento do tipo bolha, *plug* ou *slug*.

Da mesma forma, pode-se ser feita uma análise para o caso do presente trabalho, onde o valor de $v_{s,gás}$ apresenta um valor intermediário do mapa porém relativamente maior que o de $v_{s,líq}$. Com base nestes valores e através do mapa da Figura 17, percebe-se que os casos com maiores probabilidades de ocorrer são os casos estratificado e de ondas. Essa percepção foi confirmada na simulação através da variação de densidade ao longo da seção transversal. Embora o mapa indica uma variação do padrão de escoamento entre a entrada e saída, o que não ocorre, em ambos os casos o líquido se concentra na parte inferior. Isso mostra que apesar da informação dos digramas das Figuras 1 e 2 não servirem para casos específicos, sua informação pode ser útil pois a sugestão passada pelo mapa pode ser decisiva na escolha do modelo de escoamento multifásico, uma vez que para cada caso há um modelo multifásico cujos resultados são melhores.

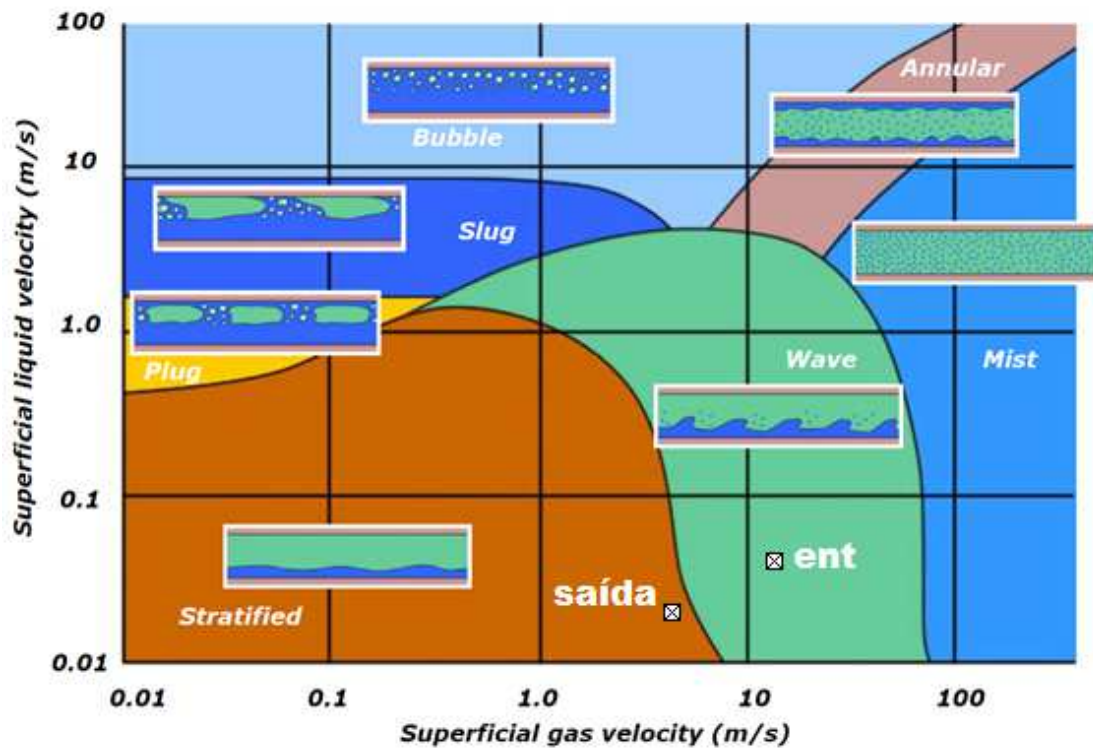


Figura 17 – Marcações das condições de entrada e saída da expansão no mapa de escoamento multifásico [8; Adaptado]

7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A modelagem e a simulação do escoamento de gás úmido e seu padrão de escoamento foi simulado pelo ANSYS FLUENT, adotando-se uma abordagem Euleriana-Euleriana através de um modelo de Mistura com presença de um fator de deslizamento e gravidade, além disso, utiliza-se também de um modelo de turbulência. A partir destes modelos foi feita uma simulação em uma geometria com expansão 3:2, no qual o objetivo era verificar o comportamento da água nas paredes desta tubulação.

Vale ressaltar que antes de utilizar o modelo de Mistura e bidimensional tentou-se usar um modelo Euleriano e tridimensional. Com relação aos modelos geométricos, o modelo 2D representou um ganho computacional significativo, uma vez que o número de elementos torna-se significativamente menor e a geometria em estudo permitia a representação bidimensional. O modelo Euleriano também não se mostrou o mais apropriado pois representou um esforço computacional muito maior que o modelo de Mistura – derivado do Euleriano – uma vez que o mesmo resolve todas as equações para cada fase.

Os modelo de mistura com o deslizamento e presença da gravidade e o modelo turbulência k- ϵ padrão se mostraram adequados uma vez que objetivo de se alcançar um regime de escoamento multifásico foi atingido. Este padrão encontrado foi condizente com aqueles apresentados pelos diagramas de padrões de escoamento, portanto os resultados foram considerados satisfatórios.

Através dos resultados verificou-se que haverá uma concentração de água na parte inferior da expansão, algo que foi sugerido pelo diagrama de escoamento bifásico, independentemente do aumento da área da seção transversal. Nos resultados isso foi caracterizado através da fina película de água de espessura menor que 1 mm.

Expansões de áreas em escoamentos, acompanhadas da conservação da vazão, sugere que na saída da expansão haverá uma queda tanto nas velocidades superficiais do gás quanto do líquido. Essa variação pode acarretar numa mudança do padrão de escoamento. Entretanto, este fato não ocorreu nas condições de escoamento escolhidas para o presente trabalho.

Portanto, para trabalhos futuros sugere-se a variação das vazões de líquido e gás. Isto significaria uma mudança na fração volumétrica das condições de contorno de entrada. Essa variação poderia acarretar numa mudança de padrão de escoamento. Um estudo interessante seria verificar como ocorre as transições de regimes de escoamento. Uma outra sugestão seria variar o percentual de deslizamento na entrada e verificar a influência do mesmo no regime de escoamento.

O fato de se manter constante uma película de água em uma região da geometria, sugere um estudo de um problema muito comum em tubulações de produção de gás que é a corrosão das tubulações e a conseqüente perda de massa nas paredes da mesma. Essas perdas de espessura são detectadas em ensaios não destrutivos feitos periodicamente nas tubulações. Existem limites mínimos de espessura da parede para que eventuais falhas não ocorram. Para que estas falhas não impliquem em rupturas, deve ser feita a troca total do trecho da tubulação, mas para efetuar esta troca deve-se, necessariamente, parar a produção. Sabe-se que qualquer perda de produção neste tipo de indústria acarreta em significativos prejuízos financeiros.

Diante deste cenário, uma melhoria implementada, mesmo que economicamente menos acessível poderia ser viável. Este fato motiva um estudo das possíveis formas de corrosão que podem ocorrer. Vale ressaltar que esta análise depende de vários fatores, como por exemplo, a composição do material da tubulação, a presença de impurezas neste material, além da composição do fluido que escoar. Uma vez que a presença de alguns fluidos como, por exemplo, sulfeto de hidrogênio (H_2S) dissolvido no fluido, pode acarretar num ataque severo à parede desprotegida da tubulação. Este estudo pode vir acompanhado de sugestões de melhoria para que o possível problema não ocorra. Esta hipótese pode envolver a composição do material da tubulação, introdução de revestimentos na parede interna, injeção de inibidores de corrosão dentre outros mecanismos de proteção.

8 - BIBLIOGRAFIA

- [1] HE, D., BAI, B. "Numerical investigation of wet gas flow in Venturi meter", State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University. 2012
- [2] BINOTI, M. A., "Simulação Numérica da Influência de Acidentes de Linha e Gás Úmido na Medição de Vazão por Medidores Deprimogênios do tipo Cone Invertido", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFES, 2014.
- [3] STEVEN, R., HALL, A. "Orifice plate meter wet gas flow performance", Multiphase and Wet Gas Flow Research, Colorado Engineering Experiment Station, 2009.
- [4] WANG, Z., YANG, C., ZHU, L. "Corrosion analysis and inhibition studies in the process of natural gas wet desulfurization", School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, 2014.
- [5] ZHENG, D., CHE, D. LIU, Y., "Experimental investigation on gas-liquid two-phase slug flow enhanced carbon dioxide corrosion in vertical upward pipeline", State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University. 2008.
- [6] BRENNEM, C. E., "Fundamentals of Multiphase Flows", California Institute of Technology, 2005.
- [7] PALADINO, E. E. "Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, 2005.
- [8] CORNELIUSSEM, S., COUPUT, J. P., DAHL, E., DYKESTEEN, E, FRØYZA, K. E., MALDE, E., MOESTUE, H., MOKSNES, P. O., SCHEERS, L., TUNHEIM, H. "Handbook of Multiphase Flow Metering", The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals, 2005.
- [9] LIU, Y., HINRICHSEN, O., "Study on CFD-PBM turbulence closures based on $k-\epsilon$ and Reynolds stress models for heterogeneous bubble column flows", Catalysis Research Center and Chemistry Department, Technische Universität München. 2014

[10] FLUENT, ANSYS FLUENT Theory Guide, ANSYS Inc., 2009.

[11] FOX, R. W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J., "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 6ª Edição, Editora LTC, 2006.

[12] HINZE, J. O., "Turbulence", McGraw-Hill Publishing Co., 1975.

[13] LAUNDER, B. E., SPALDING, D. B., "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, 1972.

[14] ASME B.36.10M, "Welded and Seamless Wrought Steel Pipe", The American Society of Mechanical Engineers, 2004.

[15] ASME 16.9, "Factory-Made Wrought Buttwelding Fittings", The American Society of Mechanical Engineers, 2012.