



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET

COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PETRÓLEO – CCEP

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Modelos de turbulência em aplicações com válvulas de orifício
empregadas na indústria de petróleo**

Vitória Freire Teodosio Santos

Orientador: Carla Wilza Souza de Paula Maitelli.

Dezembro de 2015

VITÓRIA FREIRE TEODOSIO SANTOS

**Modelos de turbulência em aplicações com válvulas de orifício
empregadas na indústria de petróleo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2015.

Prof^a. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Orientadora – UFRN

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa
Membro interno - UFRN

Prof^a. MSc Amanda Lucena de Medeiros
Membro externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, Odilon e Vera Lúcia, e ao meu irmão, Otthon Vagner.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao Senhor de todas as coisas, Deus, por ter me ajudado a enfrentar todas as dificuldades e obstáculos de minha vida acadêmica e pessoal.

A todos da minha família, que de alguma forma torceram e me ajudaram com o conforto do lar, sendo sempre minha base, meu porto seguro.

A meu pai, Odilon Teodosio, por ter sido incansável na tarefa de me mostrar que o mundo é muito grande, e que para que vá longe o conhecimento é minha melhor chance, por cada gota de suor, por cada risco que correu em sua profissão, por cada bronca, e por cada abraço de carinho.

A minha mãe, Vera Lúcia, que foi fielmente dedicada em cada hora de sono que perdeu preocupada com o meu sono, por cada conselho que me deu, por cada discurso sobre como é importante estudar não só antes de uma prova, ou de como deixar tudo para última hora era um péssimo plano, a ela, deveria ter ouvido um pouco mais.

A Gabriel Peixoto, por ter sempre um abraço, uma palavra de incentivo, pelo companheirismo, e apoio durante os perrengues, dentro e fora da universidade, passados nos últimos anos.

Aos poucos e bons amigos, os de perto e os de longe, que me fizeram ver que a universidade é muito mais que apenas horas de aula e estudo, que me ajudaram, seja numa questão de cálculo, seja numa questão da vida.

Finalmente, a todos os professores do Departamento de Engenharia do Petróleo pelos ensinamentos passados durante esses anos, em especial a minha orientadora Carla Maitelli e aos componentes do Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN) por terem me ajudado nessa tarefa final da minha graduação.

RESUMO

Para a Mecânica dos Fluidos, um fluxo de fluidos nos quais as partículas se misturam de maneira caótica, com redemoinhos, estão em estado de turbulência, sendo este regime, turbulento. Este trabalho descreve a modelagem de uma válvula de orifício por um *software* comercial, no qual foi feita a simulação com diferentes modelos de turbulência aplicados a escoamentos de fluidos compressíveis. A metodologia adotada para o estudo feito neste trabalho considerou os resultados de pressão e vazão obtidos em um ensaio real feito na indústria como ponto de validação para os resultados das simulações obtidos em laboratório. Os resultados obtidos com a análise dos modelos de turbulência aplicados no escoamento de gás pela válvula de orifício foram satisfatórios e coerentes ao que era esperado, alcançando uma vazão crítica de valor bem próximo aos encontrados no ensaio real.

Palavras-chave: Modelos de turbulência, escoamento turbulento, válvula de orifício.

ABSTRACT

For Fluid Mechanics a fluid flow which its particles are chaotically mixed, with swirls, they are considered in turbulent state, being in a turbulent regime. This research describes the modeling of an orifice valve by a commercial software, in which it was made a simulation with turbulence models applied to compressible and incompressible fluids flows. The methodology adopted for the study in this paper considered the pressure and flow rate results in an actual test done in the industry as a validation point for the simulation results obtained in the laboratory. The analysis' results of the turbulence models applied in a gas flow through the orifice valve was satisfactory and consistent to what was expected, reaching a critical flow very close to the value found in the actual test.

Keywords: Turbulence models, turbulent flow, orifice valve.

 SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	7
Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	10
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	11
1. Introdução.....	14
1.1 O estudo da turbulência e a Engenharia do Petróleo.....	14
1.2. Compressibilidade dos fluidos	15
1.3. Modelos de turbulência	15
1.4. Objetivos.....	16
2. Aspectos teóricos.....	18
2.1. Escoamentos Internos	18
2.2. Número de Reynolds	18
2.3. Número de Prandtl.....	19
2.4. Modelos de Turbulência	19
2.4.1. Modelo $k - \varepsilon$	19
2.4.2. Modelo $k - \omega$	21
2.4.3. Modelo das tensões de Reynolds (RSM)	22
2.4.3.1. SSG Reynolds.....	24
2.4.3.2. BSL Reynolds.....	24
2.4.4. Modelo de Eddy Viscosity	25
2.4.5. Modelo de turbulência SST.....	27
3. Metodologia e desenvolvimento do modelo.	29
3.1. O modelo	29
3.1.1. Geometria.....	30
3.1.2. Malha	32
3.1.3. Configurações.....	33
3.1.4. Solução e Resultados	34
4. Resultados e Discussões.....	37
4.1. Comparação utilizando o modelo de turbulência: $k - \varepsilon$	37
4.2. Comparação utilizando o modelo de turbulência: $k - \omega$	38
4.3. Comparação utilizando o modelo de turbulência das tensões de Reynolds.....	39
4.4. Comparação utilizando o modelo de turbulência Eddy Viscosity.....	41

4.5.	Comparação utilizando o modelo de turbulência SST.....	42
4.6.	Comparação Geral	42
5.	Conclusões	46
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXOS	49
	ANEXO 1- Relatório de medição.....	50
	ANEXO 2- Relatório de Malha gerado pelo CFX	52

Lista de Figuras

Figura 1- Escoamento turbulento em duto. Fonte: https://sites.google.com/site/elkhourykg/research/wall-turbulence/turbulent-pipe-flow	14
Figura 2- Camada de mistura em desenvolvimento espacial; vt: distribuição da viscosidade turbulenta; $\delta(x)$: espessura da camada em turbulência (comprimento específico) (Neto, 2004)	22
Figura 3- Etapas necessárias para simulação.	29
Figura 4-Placa de orifício fornecida pelo Prof. José Ubiragi (UFRN).	30
Figura 5- Cilindro 1 Fonte: ANSYS CFX	31
Figura 6 - Cilindro 2 Fonte: ANSYS CFX.	31
Figura 7- Cilindro 3. Fonte: ANSYS CFX.	32
Figura 8-Plano central da geometria com a malha aplicada.	32
Figura 9- Malha aplicada. Fonte: ANSYS CFX.	33
Figura 10- Tela de Set Up demonstrando as linhas do fluxo na entrada e na saída no modelo. Fonte: ANSYS CFX.	33
Figura 11-Linhas de escoamento no modelo sem contornos e velocidades durante o escoamento do fluido. Fonte: ANSYS CFX.	34
Figura 12-Linhas de escoamento no modelo com contornos e velocidades durante o escoamento do fluido. Fonte: ANSYS CFX.	35
Figura 13- Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com o modelo de turbulência $k - \epsilon$.	37
Figura 14- Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com o modelo de turbulência $k - \omega$.	38
Figura 15- Gráfico Pressão x Vazão modelo SSG Reynolds	39
Figura 16- Gráfico Pressão x Vazão do modelo de turbulência BSL Reynolds	40
Figura 17-Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com os modelo de turbulência SSG Reynolds e SSG Reynolds.	40
Figura 18-Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com os modelo de turbulência Eddy viscosity.	41
Figura 19-Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com os modelo de turbulência SST.	42
Figura 20- Comparação geral dos gráficos pressão x Vazão entre os modelos de turbulência e o ensaio real.	43

Lista de Tabelas

Tabela 1-números de Reynolds críticos praticados no escoamento de fluidos usuais na indústria do petróleo	19
Tabela 2-Coefficientes e seus valores para o modelo SSG. Fonte: (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS workbench, 2007)	24
Tabela 3- Coeficientes utilizados no método BSL Reynolds.	25
Tabela 4- Valores dos coeficientes do modelo de turbulência SST <i>Fonte:Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench.</i>	27
Tabela 5- Dados das figuras geométricas utilizadas no modelo.....	30
Tabela 6- Modelos de turbulência testados e suas porcentagens de aproximação com o ensaio real.	44

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Pr = número de Prandlt;

ν = Difusividade cinemática viscosa(m^2/s)

α = Difusividade termal(m^2/s)

V = Velocidade média do fluido (m/s)

D = Diâmetro para o fluxo no tubo(m)

μ = Viscosidade dinâmica do fluido (Ns/m^2)

ρ = Massa específica do fluido (kg/m^3)

ν = viscosidade turbulenta cinemática($Pa.s$)

k = energia cinética turbulenta(m^2/s^2)

ε = taxa de dissipação(m^2/s^3)

ω = vorticidade (s^{-1})

ℓ = comprimento específico($\delta(x)$)

Γ_t =Eddy diffusivity

Pr_t = número de Prandlt turbulento.

B = Soma das forças de corpo (N)

μ_{eff} = viscosidade efetiva(cP)

p' = pressão modificada (psi)

h_{tot} = entalpia específica total

$C_{\varepsilon 1}$ = Constante do modelo $k - \varepsilon$

\mathbf{U} = Vetor velocidade(m/s)

$C_{\varepsilon 2}$ = Constante do modelo $k - \varepsilon$

σ_ε = Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$

σ_k = Constante do modelo de turbulência para a equação de k

β = Coeficiente de expansão termal

τ = Tensão de cisalhamento

λ = condutividade térmica

S_E = Fonte de energia

Re = Número de Reynolds

ϕ = variável escalar geral

u = componente velocidade em fluxo turbulento

P_{ij} = termo produção

D_{ij} = termo difusão

ε_{ij} = taxa de dissipação

Π_{ij} = termo pressão – tensão

Ω_{ij} = termo rotacional

T = Temperatura estática($^{\circ}C$)

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Conceitua-se ainda na Mecânica dos Fluidos que o fluxo de fluidos os quais suas partículas se misturam de maneira caótica, com redemoinhos, estão em estado de turbulência, sendo seu regime turbulento (Figura 1), diferentemente do regime de fluxo linear no qual as partículas viajam de maneira organizada durante o escoamento. Segundo também Malalasekera (1995), um escoamento turbulento é caracterizado pelo movimento desenvolvido de modo caótico e desorganizado, no qual velocidade e pressão mudam continuamente com o tempo dentro de uma região de fluxo.

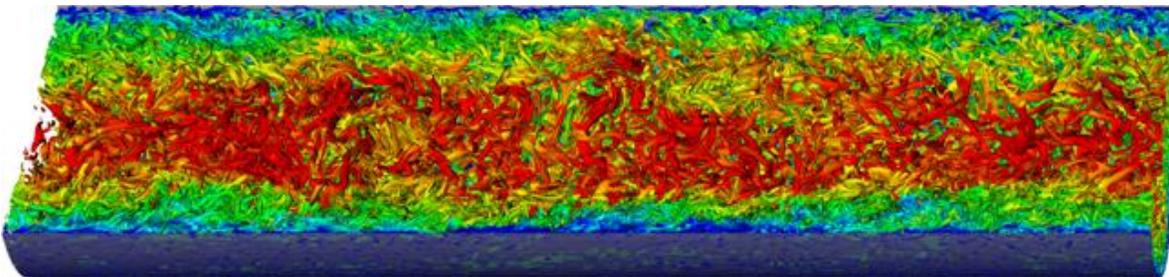


Figura 1- Escoamento turbulento em duto. Fonte: <https://sites.google.com/site/elkhourygk/research/wall-turbulence/turbulent-pipe-flow>

Na primeira etapa desse trabalho foi realizado o estudo dos modelos de turbulência $k - \epsilon$, $k - \omega$, modelo das tensões de Reynolds (SSG Reynolds e BSL Reynolds), modelo de *Eddy viscosity*, e o modelo SST. Em seguida, simulou-se no programa ANSYS CFX 13.0 a aplicação desses modelos de turbulência a um escoamento através de uma válvula de orifício. Assim, de posse desses resultados pôde-se obter os valores de vazão de produção do fluido e portanto concluir qual dos modelos de turbulência retorna valores de vazões mais próximo ao resultado do ensaio real.

1.1 O estudo da turbulência e a Engenharia do Petróleo

Na produção de petróleo, em geral, o escoamento dos fluidos ocorre em mais de uma fase tanto nas linhas de produção quanto nos poços. É comum que durante o deslocamento desses fluidos ocorra um escoamento turbulento (turbulência) em consequência tanto das mudanças das condições de operação, como também das propriedades dos fluidos e da geometria das tubulações. Sendo este fenômeno o mais comum modo de movimentação de fluidos, o qual a física moderna ainda tenta desenvolver uma teoria que o defina.

1.2. Compressibilidade dos fluidos

Os fluidos envolvidos nos escoamentos podem ser incompressíveis ou compressíveis, sendo este um detalhe importante na análise das situações reais de escoamento. Um fluido em escoamento compressível é aquele que apresenta diferentes massas específicas durante o escoamento, e a escoamentos em velocidades altas, onde o número de Mach seja maior que 0,3 (Gouvêa, 2004). Na indústria do petróleo é o caso real da produção de gases. “Para estes fluidos a equação de estado tem uma ligação com a equação de energia, ou com as equações da conservação da massa e com a equação de momento” (Versteeg & Malalasekera,1995).

Os fluidos incompressíveis são aqueles que mantêm sua densidade enquanto escoam, sendo estes normalmente líquidos, ou se em baixa velocidade, líquido e gás escoando ao mesmo tempo. Normalmente os cálculos para o fluxo desses fluidos consideram apenas as equações de massa e de momento, a equação de energia seria utilizada apenas se o processo envolvesse transferência de calor. (Versteeg & Malalasekera,1995). Com relação a escoamento incompressível o número de Mach resulta em um valor menor que 0,3, sendo o fluido incompressível ou não (Gouvêa, 2004).

O número de MACH é a razão entre a velocidade do fluxo e a velocidade do som no fluido (Fox, McDonald, & Pritchard, 2004). Sua fórmula adimensional é descrita como:

$$Ma = \frac{\text{Velocidade média relativa do objeto}}{\text{velocidade média do som}} \quad (1)$$

O valor desse número adimensional aponta se o escoamento está a velocidades tão elevadas que os efeitos da compressibilidade do fluido devem ser levados em conta ou não.

1.3. Modelos de turbulência

Na indústria de óleo e gás, em geral, os escoamentos envolvidos nos processos de produção de petróleo apresentam vórtices, fricção do fluido com as paredes da tubulação e seus acidentes, o que resulta numa necessidade de aplicação de modelos de turbulência para que perdas de carga/energia nesses processos sejam devidamente previstas e solucionadas da melhor maneira possível.

Um regime turbulento em tubulações ocorre a valores do número de Reynolds elevados. Segundo Fox et al (2004), o regime de turbulência ocorre quando o número de Reynolds é maior que 3000. Para as diversas situações encontradas nos casos de escoamento

de petróleo, podemos aplicar diferentes modelos de turbulência, como o $k-\varepsilon$ e o $k-\omega$, que são os modelos de duas equações mais utilizados atualmente. Nesses modelos de duas equações, uma é para modelar o transporte da energia cinética turbulenta, e a segunda descreve a taxa de dissipação específica ω ou ε .

1.4. Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é fazer um estudo de alguns dos modelos de turbulência aplicados a situações de escoamento de fluidos por tubulações e válvulas na indústria do petróleo. Para tanto, será feita uma revisão da literatura sobre os modelos de turbulência, em seguida, com auxílio de um *software* comercial, serão desenvolvidas simulações em uma válvula de orifício, e a partir de então avaliar os resultados obtidos no Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT) na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com os diferentes modelos de turbulência e compará-los aos resultantes do campo.

1.4.1. Objetivos Específicos

- Fazer um levantamento bibliográfico sobre modelos de turbulência empregados no escoamento de fluidos da indústria de petróleo;
- Utilizar um programa comercial para desenvolver simulações em uma válvula aplicada na indústria de petróleo;
- Avaliar os resultados nas simulações com diferentes modelos de turbulência;
- Comparar com resultados de campo.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. Aspectos teóricos

Nesta seção serão abordados os principais conceitos que são essenciais para o desenvolvimento, análise e conclusões acerca dos modelos de turbulência e suas aplicações na simulação com válvula de orifício.

2.1. Escoamentos Internos

“Escoamentos internos são os que acontecem no interior de condutos diversos com a presença de instabilidades que aparecem no interior da camada limite” (Neto, 2004). O fluido quando escoar em uma tubulação sofre os efeitos das forças de resistência próximo as paredes do conduto, como atrito oriundo da rugosidade das paredes e da viscosidade do próprio fluido. (Neto, 2004)

2.2. Número de Reynolds

Esse número foi assim chamado por ter sido descoberto por Osborne Reynolds em 1883. O número de Reynolds (Re) é um número adimensional usado na Mecânica dos Fluidos para fins de cálculos acerca de regimes de escoamento de fluidos (podendo ser laminar ou turbulento) (Coelho, 2013).

O número de Reynolds é definido como a relação entre forças de inércia e forças viscosas, logo:

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (2)$$

Ou

$$Re = \frac{D \cdot V}{\nu} \quad (3)$$

Onde:

V – Velocidade média do fluido (m/s)

D – Diâmetro para o fluxo no tubo (m)

μ – Viscosidade dinâmica do fluido (Ns/m²)

ρ – Massa específica do fluido (kg/m³)

ν – viscosidade cinemática do fluido(m^2/s)

O fenômeno da turbulência ocorre a altos números de Reynolds. Quando o fluido escoando atinge certo número de Reynolds o regime passa a ser turbulento. Na Tabela 1 estão os números de Reynolds críticos praticados no escoamento de fluidos usuais na indústria do petróleo.

Nº de Reynolds crítico	Tipo de fluxo
100	Tampão (<)
2100	Laminar (<)
3000	Turbulento (>)

Tabela 1-números de Reynolds críticos praticados no escoamento de fluidos usuais na indústria do petróleo

2.3.Número de Prandtl

O número de Prandtl é adimensional que relaciona a taxa da difusividade cinemática viscosa com a difusividade termal (Incropera, Bergman, Lavine, & Dewitt, 2014). É expresso por:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4)$$

Onde:

Pr = número de Prandtl;

ν = Difusividade cinemática viscosa(m^2/s)

α = Difusividade termal(m^2/s)

2.4.Modelos de Turbulência

2.4.1. Modelo $k - \epsilon$

Como já foi dito, este modelo de turbulência está na classe de modelos de duas equações de transporte, onde a primeira equação de transporte para energia cinética turbulenta e a segunda, para a dissipação da energia cinética turbulenta.

Este modelo é o mais aceito e válido na indústria devido ao sucesso em cálculos com variados casos de finas camadas e a adaptação em fluxos de recirculação sem necessidade de mudança de modelo de caso a caso (Malalasekera, 1995)

As equações que caracterizam o modelo $k - \varepsilon$ são:

Viscosidade turbulenta cinemática:

$$v = C_\mu \cdot \left(\frac{k^2}{\varepsilon}\right) \quad (5)$$

Onde:

$v = \text{viscosidade turbulenta cinemática}(\text{Pa} \cdot \text{s})$

$C_\mu = \text{Constante}$

$k = \text{energia cinética turbulenta}(\text{m}^2/\text{s}^2)$

$\varepsilon = \text{taxa de dissipação}(\text{m}^2/\text{s}^3)$

Energia Cinética turbulenta:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k) = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (6)$$

Taxa de dissipação específica:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \varepsilon) = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

Relações necessárias para complemento e constantes de fechamento:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44; \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (8)$$

$$\ell = C_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (9)$$

$\omega = \text{vorticidade}(\text{s}^{-1})$

$\ell = \text{comprimento específico}(\delta(x))$

2.4.2. Modelo $k - \omega$

O modelo $k - \omega$ de turbulência também pertence a classe de modelos de duas equações de transporte, onde a primeira equação de transporte para energia cinética turbulenta e a segunda, para a dissipação da energia cinética turbulenta (Wilcox, 2004).

As equações que caracterizam esse modelo são:

Viscosidade turbulenta cinemática:

$$v_t = \frac{k}{\omega} \quad (10)$$

Energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k) = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma^* v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \beta * k \omega \quad (11)$$

Taxa de dissipação específica:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \omega) = -\overline{u'_i u'_j} \alpha \frac{\omega}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma^* v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \beta * k \omega^2 \quad (12)$$

Relações para complemento da resolução do modelo e constantes de fechamento:

$$\alpha = \frac{13}{25}; \quad \beta = \beta_0 f_\beta; \quad \beta^* = \beta_0^* f_{\beta^*}; \quad \sigma = \sigma^* = \frac{1}{2}; \quad \beta_0 = \frac{9}{125}$$

$$f_\beta = \frac{1 + 70x_\omega}{1 + 80x_\omega}; \quad (13)$$

$$x_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_0^* \omega)^3} \right|; \quad (14)$$

$$\beta_0^* = \frac{9}{100} \quad (15)$$

$$f_\beta = \begin{cases} 1; & \text{se } x_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680x_k^2}{1 + 400x_k^2}; & \text{se } x_k > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$x_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad (17)$$

Se na situação em que o modelo está em uso seja necessário a avaliação de dissipação viscosa e o comprimento característico (ilustrado na Figura 2):

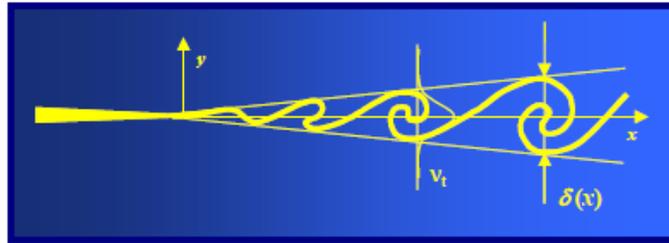


Figura 2- Camada de mistura em desenvolvimento espacial; ν_t : distribuição da viscosidade turbulenta; $\delta(x)$: espessura da camada em turbulência (comprimento específico) (Neto, 2004)

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \quad (18)$$

$$\ell = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\omega} \quad (19)$$

Para a solução das equações de complemento, as equações de tensores de rotação média e taxa de deformação média, são necessárias, logo:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (20)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (21)$$

2.4.3. Modelo das tensões de Reynolds (RSM)

O modelo das tensões de Reynolds utiliza o mesmo conjunto de constantes que os modelos baseados na viscosidade turbulenta, no entanto, consegue simular diferentes tipos de escoamentos com alto grau de confiabilidade ao preço de um alto consumo computacional (Neto, 2004).

Portanto, para que os resultados em determinadas condições de fluxo sejam mais reais a equação exata para o cálculo das tensões de Reynolds é:

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = P_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \Omega_{ij} \quad (22)$$

Equação a qual descreve seis equações diferenciais para cada número de Reynolds independentemente. Para solução da equação acima, temos:

Para o termo de produção:

$$P_{ij} = -(R_{im} \frac{\partial U_j}{\partial x_m} + R_{jm} \frac{\partial U_i}{\partial x_m}) \quad (23)$$

Para o termo de difusão:

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m} \right) - \text{div} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \text{grad}(R_{ij}) \right) \quad (24)$$

Complementos e constantes para solução:

$$C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \\ v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} ; \quad (25)$$

A taxa de dissipação ε_{ij} é determinada assumindo isotropia nos pequenos redemoinhos dissipativos (Malalasekera, 1995).

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} \quad (26)$$

Considerações para solução:

$$\delta_{ij} = 1, \text{ se } i = j;$$

$$\delta_{ij} = 0, \text{ se } i \neq j;$$

O termo de pressão-tensão é o mais importante para que o modelo retorne valores precisos, para tal temos:

$$\Pi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(R_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \quad (27)$$

Considerando as constantes:

$$C_1 = 1,8 \text{ e } C_2 = 0,6$$

Para o termo rotacional a equação abaixo se aplica:

$$\Omega_{ij} = -2\omega_k (R_{jm} e_{ikm} + R_{im} e_{jkm}) \quad (28)$$

2.4.3.1. SSG Reynolds

O método SSG foi desenvolvido por Speziale, Sarkar e Gatski. Esse método utiliza a relação quadrática para a correlação pressão-tensão (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, 2007).

Os coeficientes utilizados pelo programa para solução do método SSG estão na Tabela 1.

Coeficientes	Valor
$C_{\mu RS}$	0,1
$S_{e RS}$	1,36
c_s	0,22
$c_{\epsilon 1}$	1,45
c_{e2}	1,83
C_{s1}	1,7
C_{s2}	-1,05
C_{r1}	0,9
C_{r2}	0,8
C_{r3}	0,65
C_{r4}	0,625
C_{r5}	0,2

Tabela 2-Coeficientes e seus valores para o modelo SSG. Fonte: (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS workbench, 2007)

2.4.3.2. BSL Reynolds

O método BSL ou método de *Baseline k- ω* , foi desenvolvido pois dependendo do valor determinado para ω na entrada quando se utiliza o método $k - \omega$, pode gerar uma instabilidade nos resultados do modelo (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, 2007).

A equação abaixo descreve este modelo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \omega) & \quad (29) \\ & = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \nabla \omega \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega + \alpha_3 \frac{\omega}{k} p_k \\ & \quad - \beta_3 \rho \omega^2 \end{aligned}$$

Para a solução são utilizados os coeficientes da Tabela 3.

Coeficientes	Valor padrão
σ_{k1}	2,0
$\sigma_{\omega 1}$	2,0
β_1	0,075
σ_{k2}	1,0
$\sigma_{\omega 2}$	1/0,856
β'	0,09
α_1	5/9
β_2	0,0828
α_2	0,44

Tabela 3- Coeficientes utilizados no método BSL Reynolds.

2.4.4. Modelo de Eddy Viscosity

Essa proposta de modelo de turbulência refere-se à turbulência como se fosse resultado de pequenos redemoinhos que estariam se formando e dissipando-se a todo momento, estando o fluxo num modo ao qual as tensões de Reynolds seriam proporcionais aos principais gradientes de velocidade e também com a *Eddy Viscosity* pela teoria do gradiente de difusão. (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, 2007)

Logo temos:

$$-\rho \overline{u \otimes u} = \mu_T (\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} \delta (\rho k + \mu_t \nabla \cdot U) \quad (30)$$

Com $\mu_T = \text{Eddy Viscosity}$ ou viscosidade turbulenta.

“Assim como a hipótese *Eddy viscosity*, a hipótese de *Eddy diffusivity*, estabelece que os fluxos de Reynolds de um escalar são linearmente relacionados ao principal gradiente escalar” (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, 2007)

$$-\rho, kb\bar{u}\bar{\phi} = \Gamma_t \nabla \phi \quad (31)$$

Onde Γ_t é o termo que representa a “Eddy diffusivity”, o qual é descrito por:

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (32)$$

Onde:

$Pr_t = \text{número de Prandtl turbulento.}$

A partir de então *Eddy diffusivity* é descrita pelo número de Prandtl turbulento. No entanto a equação é válida apenas se o termo da viscosidade turbulenta é conhecido (μ_t), o que, para tanto, se faz necessário ou o modelo $k - \varepsilon$ ou o $k - \omega$ (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, 2007).

Dito isso a equação média de Reynolds e a equação de transporte se torna:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = B \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla U + (\nabla U)^T)) \quad (33)$$

Onde:

$B = \text{Soma das forças de corpo}$

$\mu_{eff} = \text{viscosidade efetiva} = \mu + \mu_t$

$p' = \text{pressão modificada} = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_t \bar{\nabla} \cdot U$

No entanto o programa assume $p=p'$ para solução.

Após a solução dos passos anteriores a equação de Reynolds para o modelo de *Eddy Viscosity* se torna:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot \left(\lambda \nabla \tau + \frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla h \right) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + S_E \quad (34)$$

2.4.5. Modelo de turbulência SST

O modelo “*Shear Stress Transport*” combina as vantagens dos modelos de turbulência clássicos de $k - \omega$ e $k - \varepsilon$. Apesar das semelhanças com o modelo $k - \omega$ sua principal modificação acontece no termo de produção na equação da energia cinética turbulenta (ANSYS CFX – Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, 2007).

Onde $P_t = \mu_t \phi$ é substituído por $P_t = \min(\mu_t, \phi, C_{lmt}\varepsilon)$.

Uma segunda mudança neste modelo acontece com a adição de novo termo de dissipação na equação da taxa dissipação específica:

$$\frac{(1 - F_1)2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega} \left[\frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] \quad (35)$$

Onde o programa assume que F_1 é igual a um perto da parede da tubulação e igual a zero longe da parede. Os coeficientes utilizados estão na Tabela 4.

Coeficientes	Valor padrão
C_{lmt}	10^5
σ_{k1}	1,176
$\sigma_{\omega 1}$	2,0
γ_1	0,5532
β'_1	0,075
σ_{k2}	1,0
$\sigma_{\omega 2}$	1,168
γ_2	0,4403
β'_2	0,0828

Tabela 4- Valores dos coeficientes do modelo de turbulência SST *Fonte: Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench.*

Capítulo 3

Metodologia e Desenvolvimento da Modelagem

Matemática

3. Metodologia e desenvolvimento do modelo.

3.1. O modelo

Utilizando o programa ANSYS foi desenvolvido o modelo de um escoamento por uma válvula de orifício na qual foram testados alguns dos modelos de turbulência disponíveis no *software*, de modo que os resultados se aproximassem ao máximo dos resultados de um modelo teste fornecido pela indústria. O fluido utilizado nas simulações foi o metano (CH_4), de massa molar $16,04(\text{kg}/\text{kmol})$ e viscosidade dinâmica $11,1 \times 10^{-6}(\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s})$ a 25°C em estado de gás ideal. Para os objetivos do trabalho foi utilizado o ANSYS para os cálculos da área de entrada e a velocidade do fluido nos pontos de pressão determinados, para assim obter a vazão por dia do fluido através da válvula de orifício.

Para que a simulação seja feita é necessário que as etapas apontadas pelo programa, ao ser solicitado a criação de um novo modelo, sejam concluídas. Como observado na Figura 3, são elas Geometria, Malha, Configurações, Solução e Resultados.



Figura 3- Etapas necessárias para simulação.

3.1.1. Geometria

A primeira etapa na utilização de programas CFD, como o ANSYS, é o desenvolvimento de um modelo geométrico que represente o fenômeno físico em questão. Neste trabalho foram utilizadas algumas medidas de uma válvula de orifício de um ensaio realizado pela indústria, juntamente a medidas de comprimento, e raio do orifício de um modelo físico de uma placa de orifício (Figura 3) fornecida pela prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes, do Departamento de Engenharia Mecânica. Os valores da geometria foram fornecidos por um relatório do laboratório de metrologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com a colaboração do Prof. Dr. Msc. Luiz Pedro de Araújo (Anexo 1).

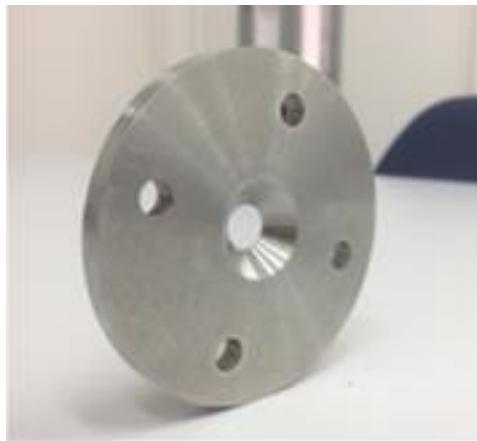


Figura 4-Placa de orifício fornecida pelo Prof. José Ubiragi (UFRN).

O modelo simulado foi feito a partir da junção de 3 cilindros, dois idênticos (Figura 4 e Figura 5), e um menor (Figura 6), representando o orifício da válvula.

Os dados da geometria estão apresentados na Tabela 4.

Peça	Comprimento	Raio
Cilindro 1	50 mm	19,01 mm
Cilindro 2	50mm	19,01 mm
Cilindro 3	6,01mm	4 mm

Tabela 5- Dados das figuras geométricas utilizadas no modelo.

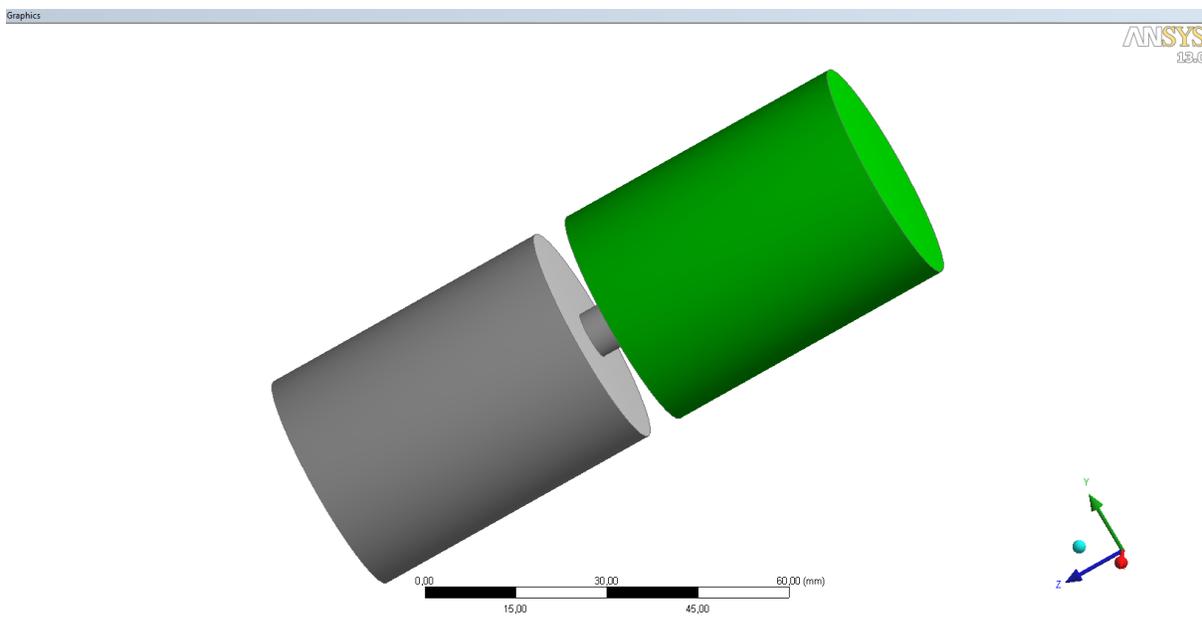


Figura 5- Cilindro 1 Fonte: ANSYS CFX

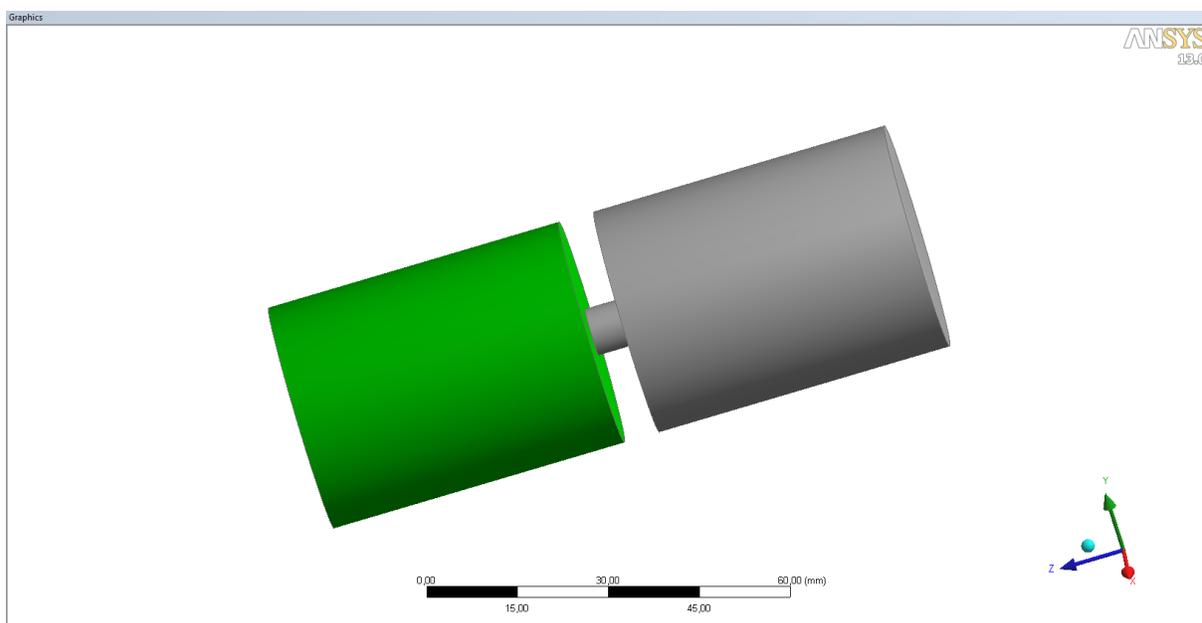


Figura 6 - Cilindro 2 Fonte: ANSYS CFX.

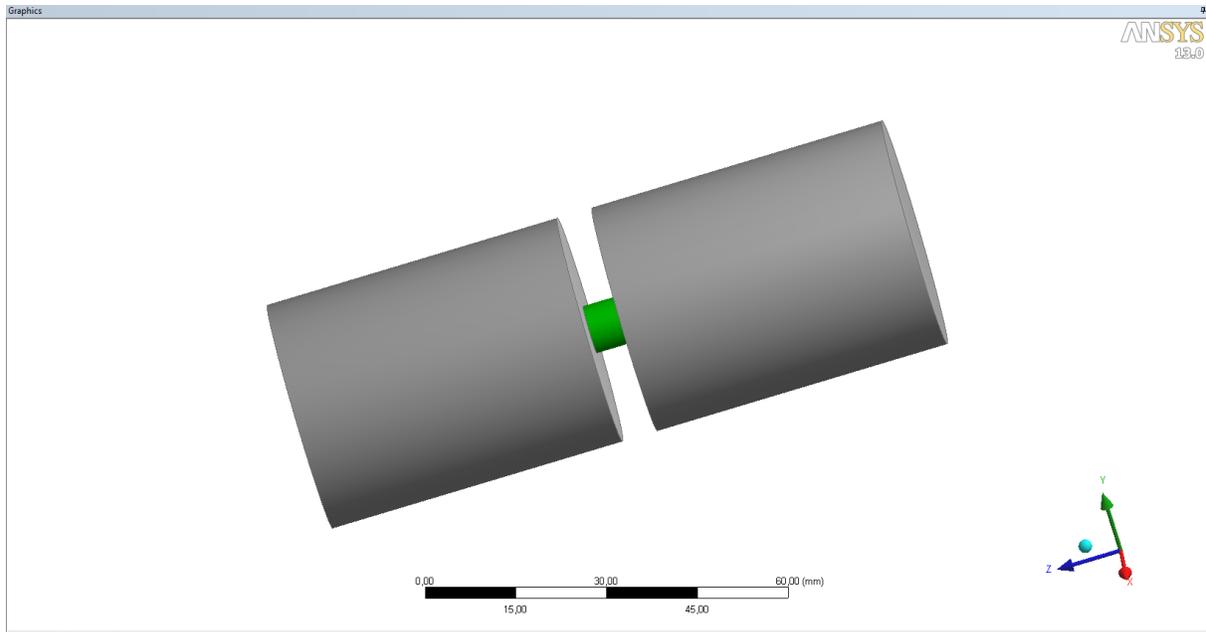


Figura 7- Cilindro 3. Fonte: ANSYS CFX.

3.1.2. Malha

Nesta etapa é possível refinar a geometria em uma malha criada pelo ANSYS CFX para análise precisa dos dados do modelo criado. A malha utilizada, Figura 7 e Figura 8, foi criada com aproximadamente 3266 nós e 16017 elementos, no modelo tetraédrico como demonstra o relatório de malha (Anexo 2).

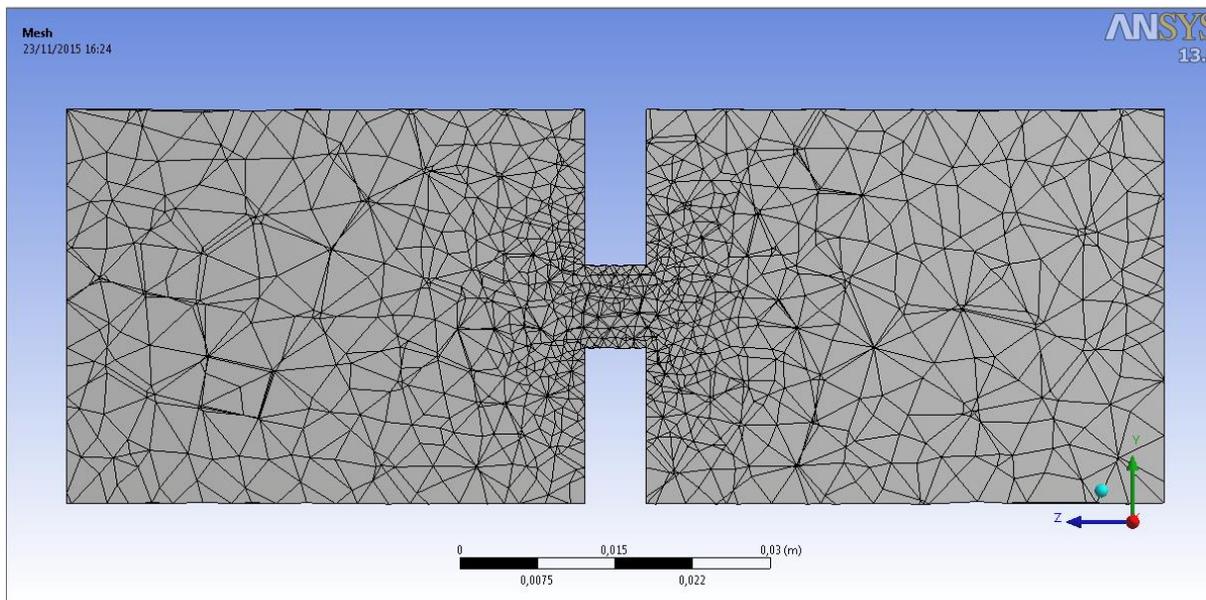


Figura 8-Plano central da geometria com a malha aplicada.

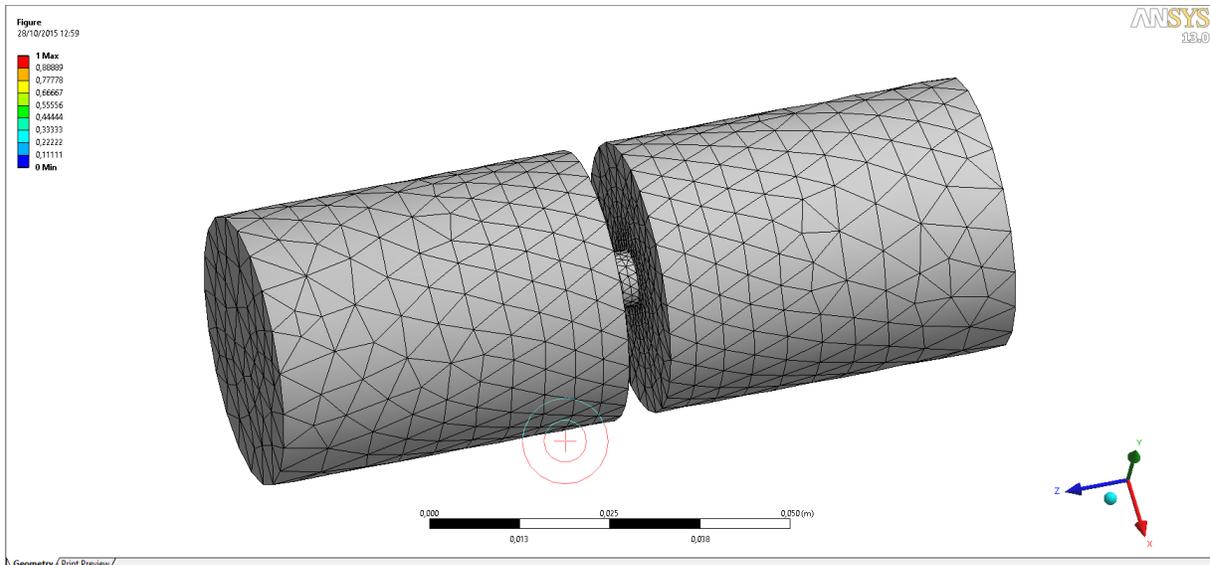


Figura 9- Malha aplicada. Fonte: ANSYS CFX.

3.1.3. Configurações

Na terceira etapa de geração do modelo são definidos valores para configurações do escoamento do fluido no modelo, como pressão de entrada e saída (Figura 9), e o modelo de turbulência a ser simulado.

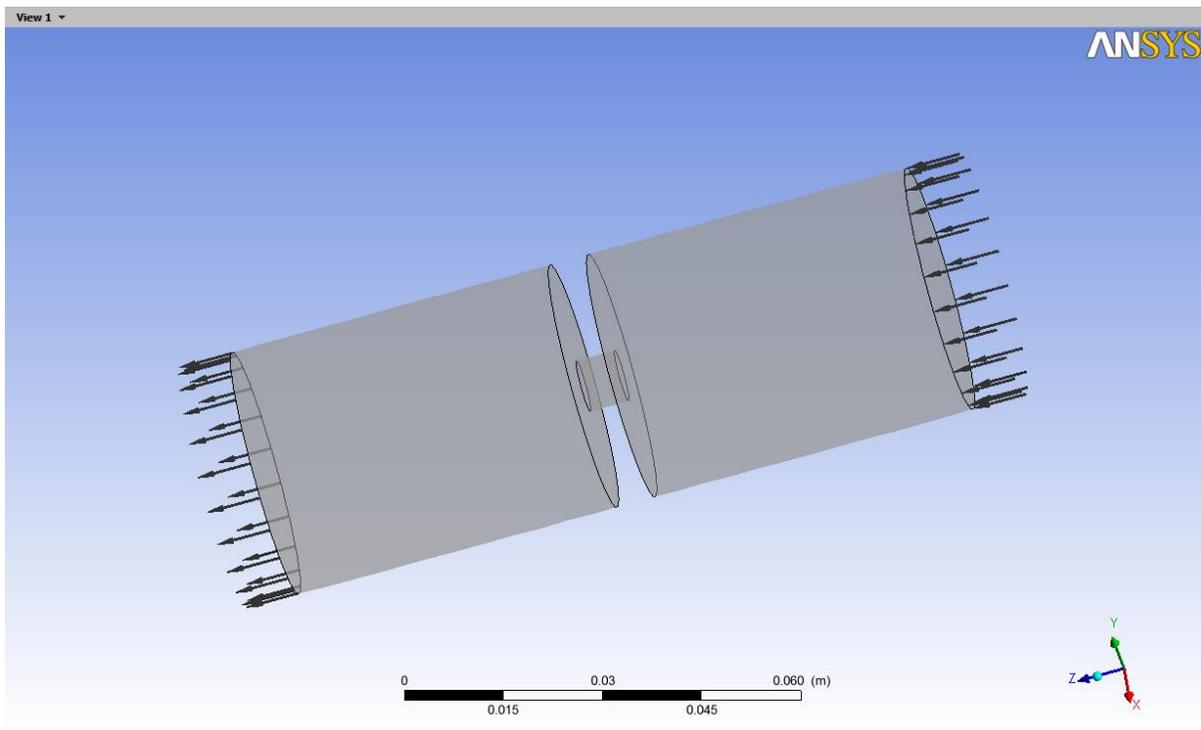


Figura 10- Tela de Set Up demonstrando as linhas do fluxo na entrada e na saída no modelo. Fonte: ANSYS CFX.

3.1.4. Solução e Resultados

Na etapa *solução* o modelo é colocado para simular com os dados definidos nas sessões anteriores. São gerados gráficos que ajudam na análise do erro na simulação a partir da convergência das linhas dos gráficos, ao mesmo tempo que de acordo com o desenvolvimento da simulação mensagens são mostradas na tela caso existam erros no modelo.

Na sessão *Resultados* a simulação já obteve sucesso e assim permite ao usuário ter acesso as várias funções disponíveis pelo programa para análise do modelo, assim sendo possível a geração de linhas de escoamento (Figura 10 e Figura 11), o cálculo de propriedades como pressão, velocidade e área preenchida pelo fluido em escoamento.

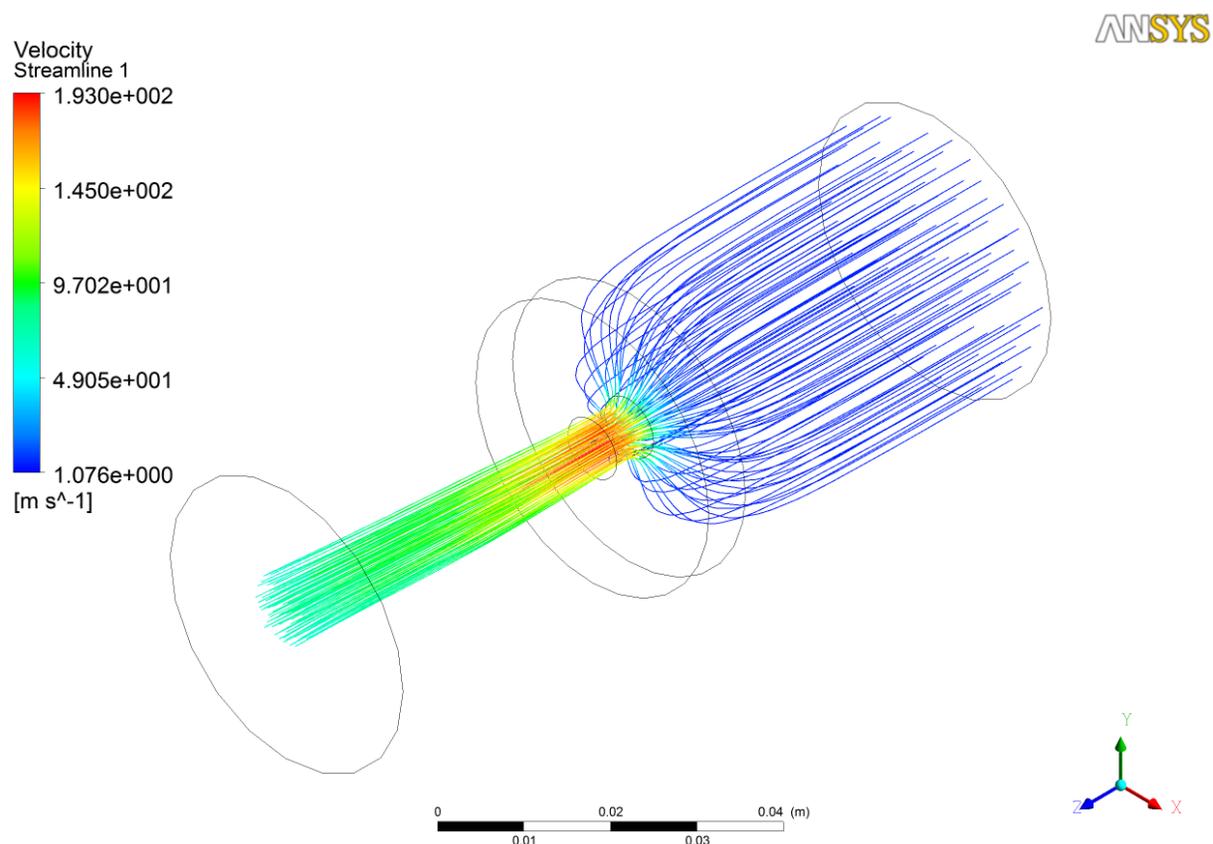


Figura 11-Linhas de escoamento no modelo sem contornos e velocidades durante o escoamento do fluido.

Fonte: ANSYS CFX.

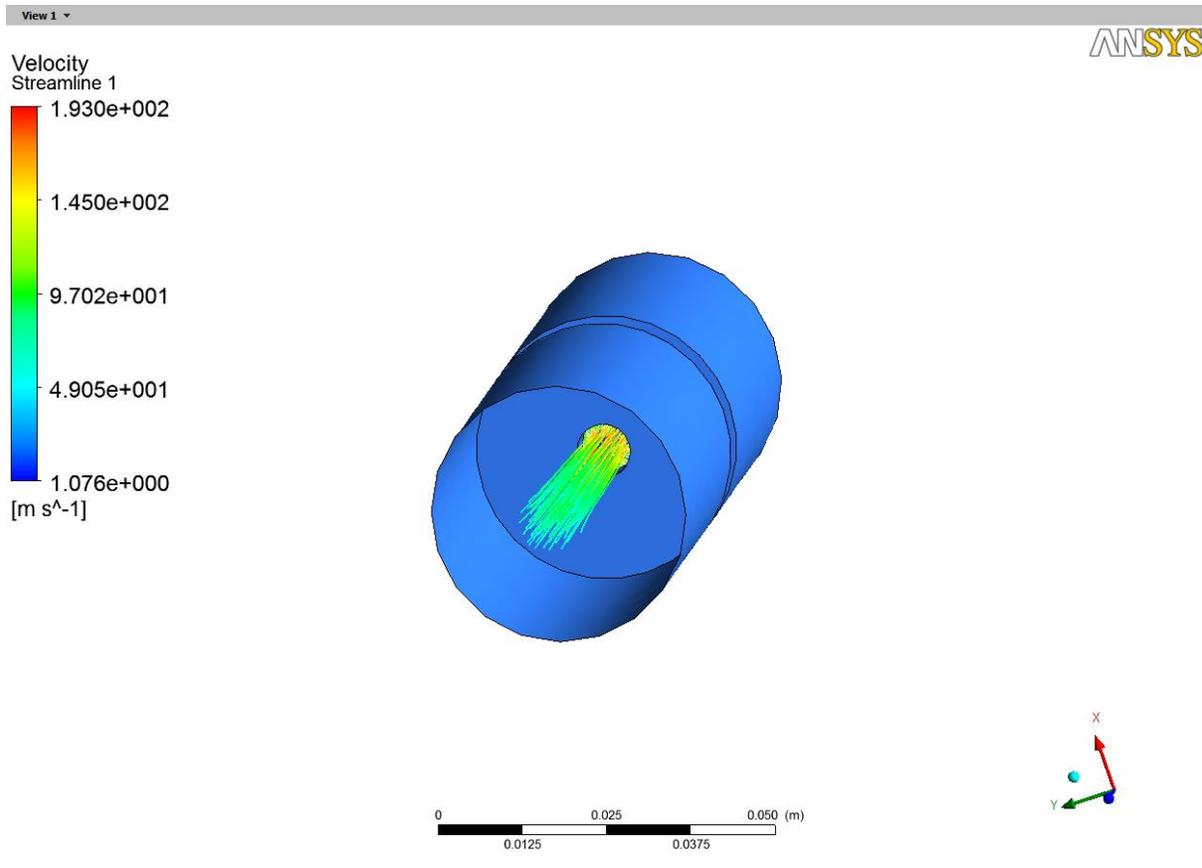


Figura 12-Linhas de escoamento no modelo com contornos e velocidades durante o escoamento do fluido.

Fonte: ANSYS CFX

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

Após o desenvolvimento do modelo no ANSYS, e a devida simulação dos modelos de turbulência sobre o mesmo, é necessário garantir que os resultados encontrados sejam coerentes com os encontrados em situações reais.

Para que o modelo desenvolvido seja assim validado, compararam-se os resultados de vazão obtidos em cada modelo de turbulência aplicado a válvula de orifício com os resultados obtidos em um ensaio realizado na indústria com uma válvula de características semelhantes.

Os gráficos foram gerados com os valores de pressões (*psi*) testados no eixo x e os das vazões (m^3STD/d) encontradas no eixo y, de modo que de acordo com o aumento das pressões as vazões fossem acompanhadas.

4.1. Comparação utilizando o modelo de turbulência: $k - \epsilon$.

De posse dos resultados do ensaio real feito pela indústria, foi aplicado ao modelo simulado o modelo de turbulência $k - \epsilon$, o qual a coleta dos dados originados pelo software ANSYS aplicados no Microsoft Office Excel resultaram no gráfico da Figura 12.

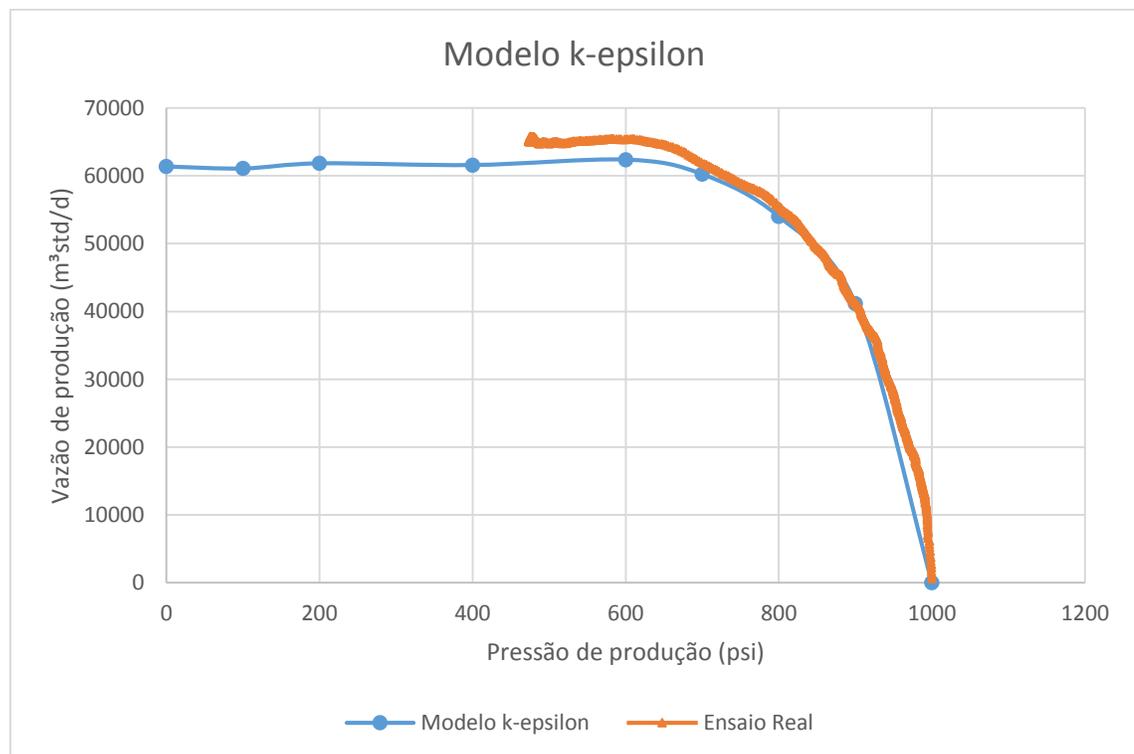


Figura 13- Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com o modelo de turbulência $k - \epsilon$.

Após análise dos gráficos percebe-se que o modelo simulado no software ANSYS utilizando o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e o resultante do ensaio real, percebe-se que a vazão crítica encontrada é de 62371,49 m³/dia, já no modelo real é de 65520,64 m³/dia, sendo apesar de um pouco mais baixa, uma vazão bem próxima ao esperado, sendo 95,19% de proximidade ao modelo real. Com uma taxa de erro relativo de aproximadamente 4,8%.

4.2.Comparação utilizando o modelo de turbulência: $k - \omega$.

Com a aplicação do modelo $k - \omega$ ao modelo criado no ANSYS gerou-se o gráfico da Figura 13 para análise da vazão do fluido pela válvula de orifício utilizada no projeto:

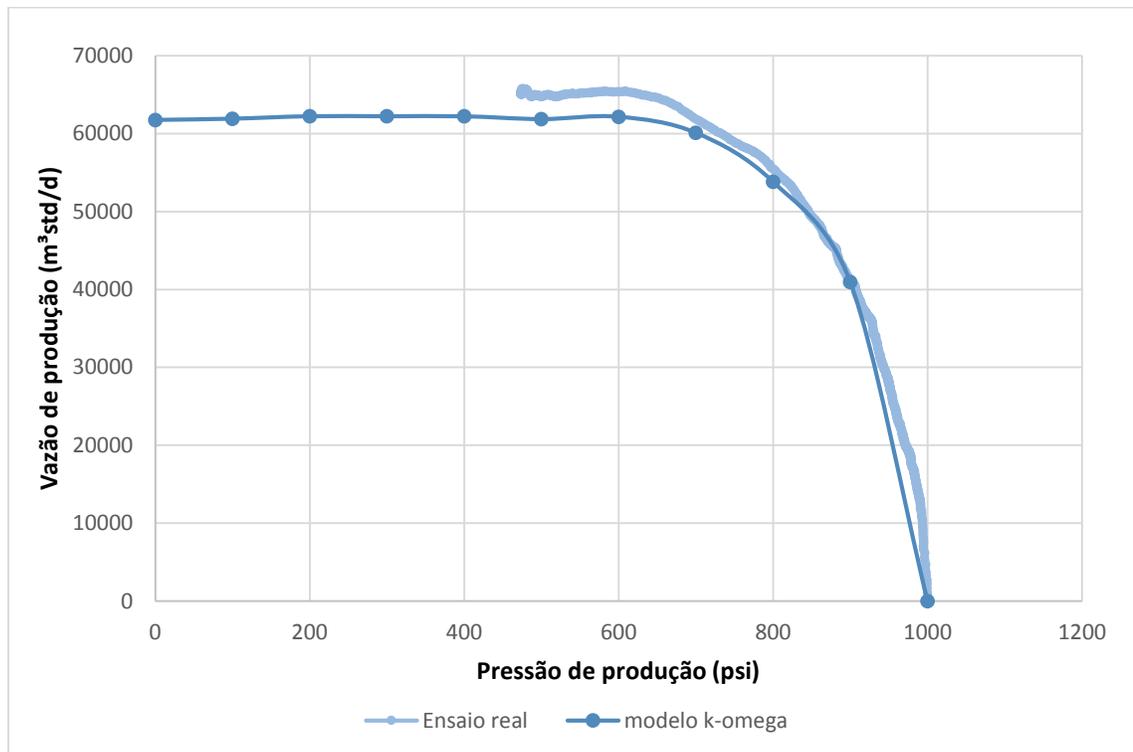


Figura 14- Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com o modelo de turbulência $k - \omega$.

Ao analisarmos ambos os resultados, oriundos do ensaio real e do modelo simulado no software ANSYS, as vazões críticas obtidas nos dois conjuntos de resultados são diferentes, sendo a vazão crítica do modelo simulado de 62244,69 m³/dia, e a do ensaio real de 65520,64 m³/dia, estando o modelo simulado com uma proximidade de 95% do esperado, o resultado do ensaio real. Com uma taxa de erro relativo de aproximadamente 5%.

4.3. Comparação utilizando o modelo de turbulência das tensões de Reynolds.

Para o modelo de turbulência das tensões de Reynolds o programa apresenta algumas opções para simulação no modelo criado virtualmente. No entanto, simulou-se utilizando SSG Reynolds e BSL Reynolds. Os resultados gráficos encontrados estão descritos na Figura 14 para o SSG Reynolds e na Figura 15 para BSL Reynolds. A Figura 16 descreve a comparação dos dois modelos com a curva originada do ensaio real.

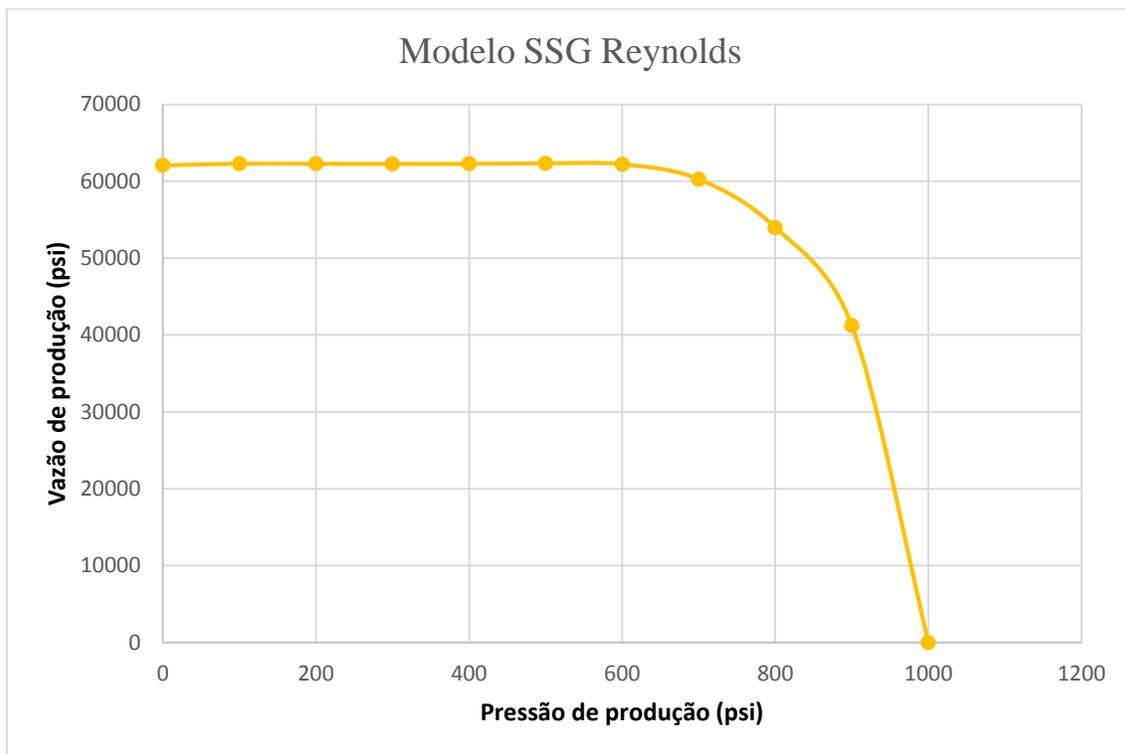


Figura 15- Gráfico Pressão x Vazão modelo SSG Reynolds

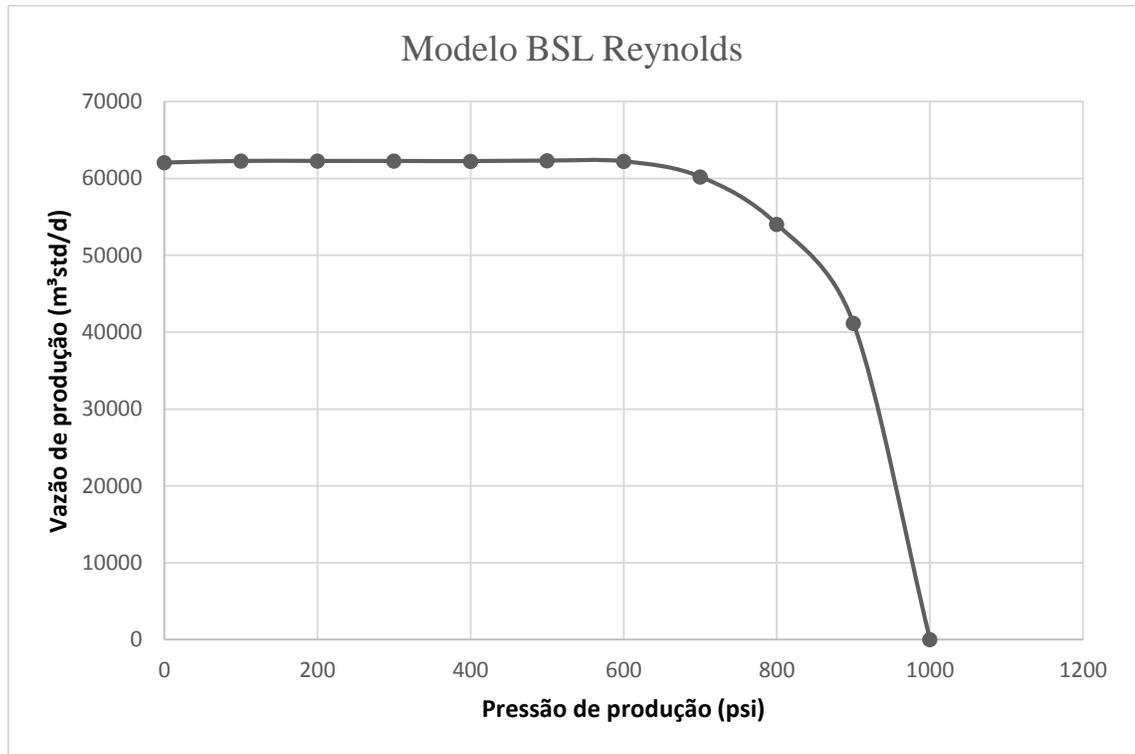


Figura 16- Gráfico Pressão x Vazão do modelo de turbulência BSL Reynolds.

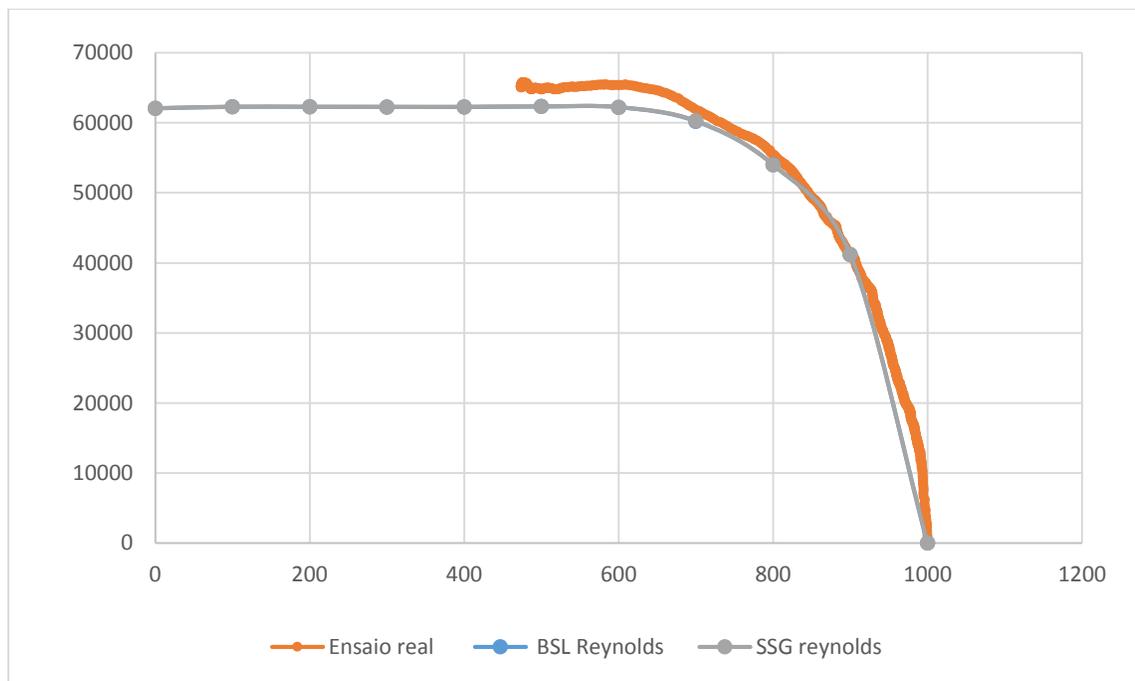


Figura 17-Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com os modelo de turbulência SSG Reynolds e BSL Reynolds.

Após análise dos modelos de turbulência de Reynolds escolhidos para simulação nota-se que independente de qual seja escolhido SSG Reynolds ou BSL Reynolds, os resultados obtidos são praticamente os mesmos um do outro. Nota-se que na Figura 17 o gráfico do BSL Reynolds nem mesmo está aparente, pois esta sobreposto pelo gráfico do SSG Reynolds.

Com a análise dos pontos calculados notamos que a vazão crítica do modelo SSG Reynolds é de 62333,2 m³/dia, já a do modelo BSL Reynolds é de 62309,56 m³/dia, o que aponta, dentre os dois métodos das tensões de Reynolds utilizados, como o método SSG um pouco mais próximo (95,57%) da vazão crítica encontrada no ensaio do modelo real, de 65220,54 m³/dia, enquanto o modelo BSL Reynolds se aproxima 95,53% deste valor. Logo, com uma taxa de erro relativo de aproximadamente 4,43% para o método SSG e de 4,47% para o método BSL.

4.4. Comparação utilizando o modelo de turbulência Eddy Viscosity.

Nesta etapa comparou-se os resultados obtidos através do software ANSYS no modelo simulado, com o modelo de turbulência de Eddy Viscosity, para fins de comparação aos resultados obtidos no ensaio do modelo de válvula de orifício real. Com a aplicação dos valores obtidos gerou-se o gráfico da Figura 17 para Eddy Viscosity comparado aos resultados do ensaio real.

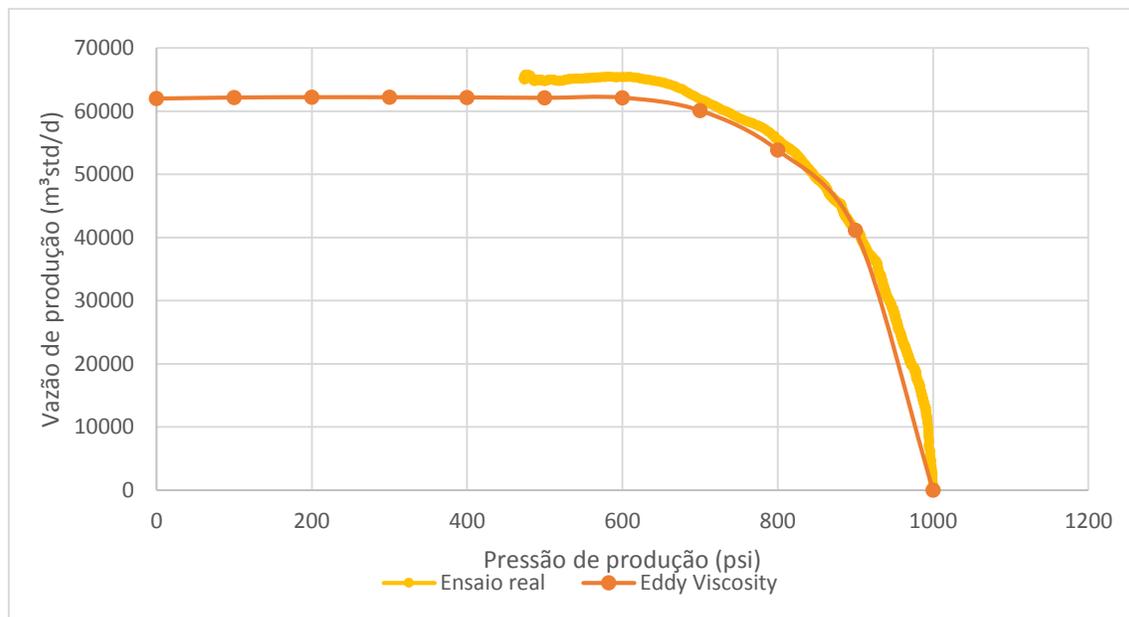


Figura 18-Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com os modelo de turbulência Eddy viscosity.

Com o estudo dos gráficos observa-se que o modelo desenvolve até uma vazão crítica de 62205,72 m³/dia, o que se aproxima em 95,38% do valor crítico encontrado no modelo de ensaio real. Com uma taxa de erro relativo de aproximadamente 4,62%.

4.5. Comparação utilizando o modelo de turbulência SST.

Nesta etapa fez-se o mesmo processo feito com os modelos de turbulência anteriores, e com os resultados oriundos do programa de simulação (ANSYS) o gráfico da Figura 18 foi gerado:

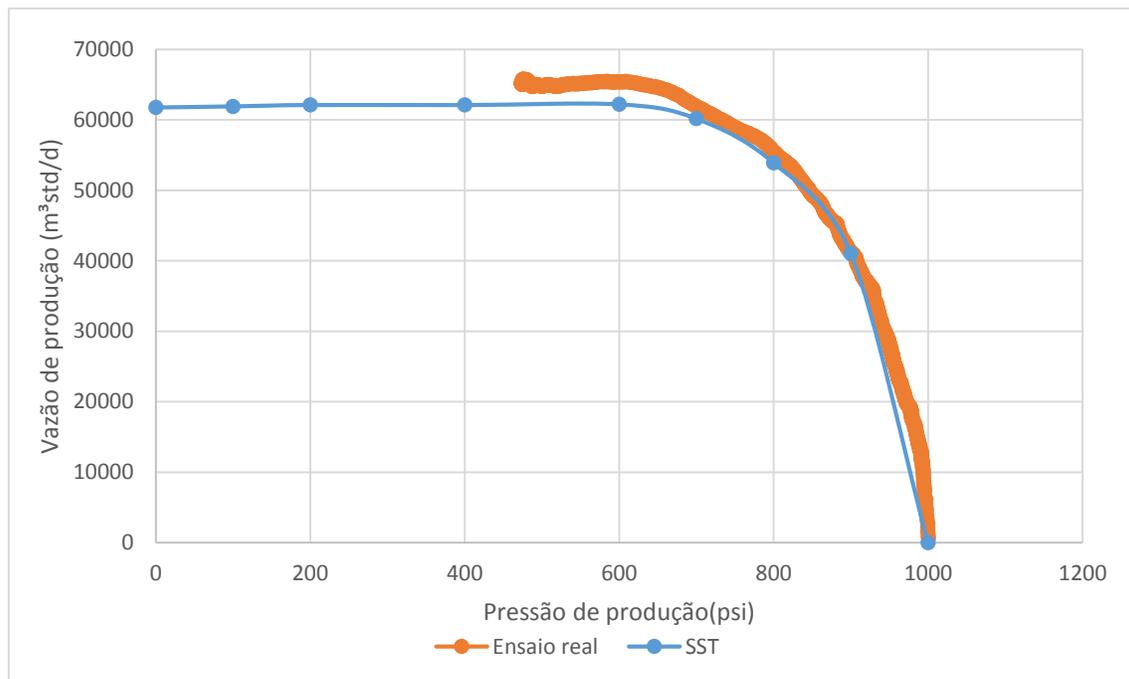


Figura 19-Gráfico comparação entre modelo real e o simulado com os modelo de turbulência SST.

A partir da análise dos gráficos acima encontrou-se para o modelo SST uma aproximação de 95,37% (62204,9 m³/dia) do valor de vazão crítica encontrados no ensaio do modelo real, de 65220,54 m³/dia. Com uma taxa de erro relativo de aproximadamente 4,63%.

4.6. Comparação Geral.

Para uma análise final de todos os resultados e verificação de qual dos modelos teria um melhor resultado para escoamento do gás de acordo com a validação da comparação com o ensaio real, criou-se o gráfico geral de todos os modelos (Figura 19).

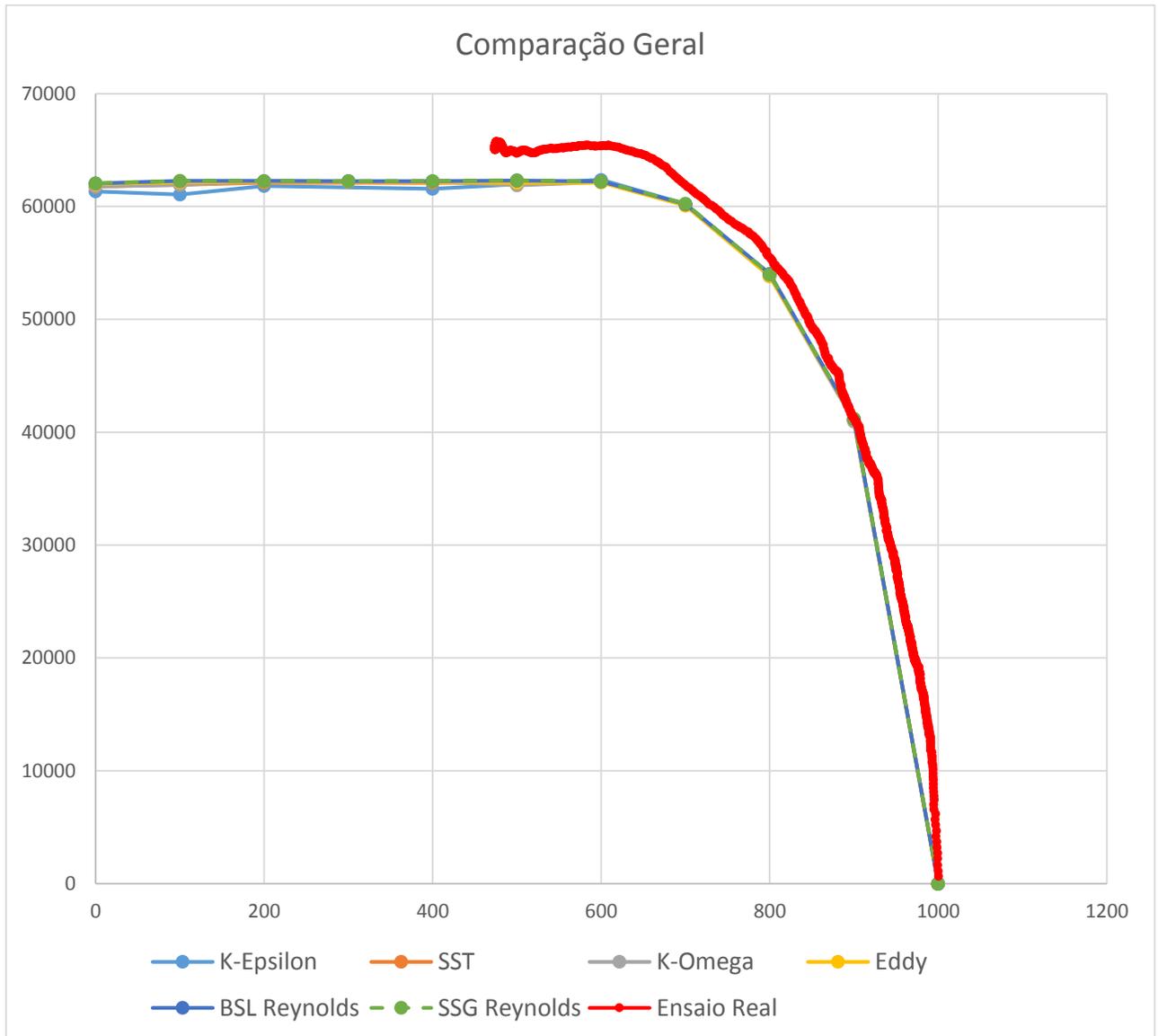


Figura 20- Comparação geral dos gráficos pressão x Vazão entre os modelos de turbulência e o ensaio real.

Observamos que os resultados oriundos das simulações com os modelos de turbulência na mesma válvula de orifício, com as mesmas condições de escoamento, geraram curvas bem aproximadas umas das outras, ficando suas diferenças apenas nas casas decimais dos seus percentuais de aproximação com o resultado do ensaio real.

Modelo de turbulência	Porcentagem de aproximação do ensaio real
$k - \varepsilon$	95,19%
$k - \omega$	95%
Reynolds SSG	95,57%
Reynolds BSL	95,53%
Eddy Viscosity	95,38%
SST	95,37%

Tabela 6- Modelos de turbulência testados e suas porcentagens de aproximação com o ensaio real.

Logo, percebe-se com análise da Tabela 5, que o modelo mais próximo ao real foi o Reynolds SSG, com 95,57% de aproximação, e o pior resultado apesar da pouca diferença com os outros, foi o resultante do modelo $k - \omega$, com 95% de aproximação. Gerando assim, resultados satisfatórios independentemente do modelo de turbulência aplicado ao escoamento.

Capítulo 5

Conclusões

5. Conclusões

Neste trabalho foi feita a análise dos modelos de turbulência aplicados ao escoamento por válvula de orifício, utilizando-se simulações computacionais a partir do software ANSYS. Com as simulações geradas foi possível analisar as propriedades do escoamento, como pressão, velocidade e vazão, assim como os efeitos de cada modelo de turbulência no fluxo do CH₄.

A metodologia para efetivação do trabalho foi aplicar os dados vindos de um ensaio realizado na indústria, com uma válvula de orifício da empresa, juntamente com os dados fornecidos pelo Departamento de Metrologia da UFRN, sobre uma válvula de orifício pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da mesma instituição, para elaboração de uma modelo de geometria similar a uma válvula de orifício utilizada em situações reais. O modelo foi gerado e simulado no software comercial, ANSYS, e seus dados e gráficos foram obtidos no Microsoft Office Excel.

Para que o modelo desenvolvido fosse validado, foi feita a comparação dos resultados de vazão obtidos, com o resultado gerado pelo ensaio real com a válvula de orifício na indústria. Conclui-se que o modelo desenvolvido virtualmente com os modelos de turbulência aplicados ao escoamento do fluido gerou resultados coerentes e satisfatórios, acima de 95% de aproximação ao resultado do ensaio real, com todos os modelos de turbulência aqui estudados, sendo assim os valores encontrados são satisfatórios independente do modelo de turbulência aplicado ao escoamento.

Portanto, visando-se obter resultados oriundos dos modelos de turbulência de diferentes valores aos encontrados, seria necessário um estudo mais aprofundado dos mesmos, que devido ao curto tempo de desenvolvimento do trabalho não foi possível tal avaliação em tempo hábil para apresentação deste.

Como sugestão de trabalhos futuros, pretende-se realizar simulações dos modelos de turbulência com outros tipos de fluidos, e outros testes de geometria para simulação com líquidos.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS

ANSYS CFX – THEORY REFERENCE FOR ANSYS AND ANSYS WORKBENCH, Ansys CFX Release 13.0. Ansys, Inc. January, 2007. 1110f. (Manual). USA.

Coelho, P. (12 de outubro de 2013). *Numero de Reynolds*. <
<http://www.engquimicasantosp.com.br/2013/10/numero-de-reynolds.html> >.
Acesso em: 24 de novembro de 2015.

Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2004). *Introduction to Fluid Mechanics*. Bogotá: k-t-dra.

Gouvêa, M. T. (2004). *Escoamento compressível e incompressível*.

Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., & Dewitt, D. P. (2014). *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. LTC.

Malalasekera, H. K. (1995). *Computational Fluid Dynamics*. Londres: Longman Scientific & Technical.

Neto, A. d. (2004). *Turbulência nos Fluidos Aplicada*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. (Apostila)

Patankar, S. V. (s.d.). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.

Wilcox, D. C. (julho de 1993). *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California, EUA.

ANEXOS

ANEXO 1- Relatório de medição

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE METROLOGIA - LabMetrol

**RELATÓRIO DE MEDIÇÃO Nº 008-2015**

Requerente: LAUT - Laboratório de Automação / DCA / NTI / CT / UFRN.

Endereço: Campus Universitário, s/n, Lagoa Nova, 59078-970 - Natal/RN.

Doc. de Referência: Solicitação por e-mail

CARACTERÍSTICAS DO INSTRUMENTO

Instrumento: Placa de Orifício

Fabricante: Não consta.

Nº de Identificação: Não consta.

Nº de Série: Não consta.

Data da Medição: 08/10/2015

CARACTERÍSTICAS DOS PADRÕES

Padrões utilizados:

. Máquina Tridimensional de Medição por Coordenadas.

Incerteza: $\pm (0,6 + L / 1100) \mu\text{m}$, onde L = Comprimento em "mm".

Nº do Certificado de Calibração: 08728 / 15 – Mitutoyo / RBC.

Validade: 09/2018

. Projetor de Perfil Mitutoyo.

Incerteza: $\pm 4 \mu\text{m}$.

Nº do Certificado de Calibração: 08847 / 15 – Mitutoyo / RBC.

Validade: 09/2018

PROCEDIMENTO DA CALIBRAÇÃO

As medições foram realizadas utilizando-se os padrões do Laboratório de Metrologia a uma temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, aplicando o procedimento de medição LabMetrol - D03.

Data de emissão do certificado: 08/10/2015 Página 1 de 2

ESTE CERTIFICADO É VÁLIDO EXCLUSIVAMENTE PARA O INSTRUMENTO CALIBRADO NAS CONDIÇÕES ESPECIFICADAS, NÃO SENDO EXTENSIVO A QUAISQUER LOTES, MESMO QUE SIMILARES. SUA REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DEPENDERÁ DA AUTORIZAÇÃO FORMAL DO ÓRGÃO METROLÓGICO EMITENTE.
Av. Sen. Salgado Filho, 3000 - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal/RN - CEP: 59.078-970 - Telefax: (0xx84) 3213-3742 - E-mail: labmetrol@ct.ufrn.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE METROLOGIA - LabMetrol

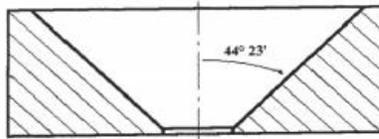


RELATÓRIO DE MEDIÇÃO Nº 008-2015

TABELA DE RESULTADOS

Dimensão	V.V.	Incerteza	k
<i>Diâmetro interno maior</i>	21,10	0,02	2,0
<i>Diâmetro interno menor</i>	9,96	0,01	2,0
<i>Espessura da placa</i>	6,01	0,01	2,0
<i>Ângulo do cone</i>	44° 23'	± 1'	2,0

Dimensões lineares em mm



As incertezas dos resultados apresentadas na tabela acima, possuem um nível de confiança de 95,45% e foi determinada conforme recomendação EA - 04/2.

Alex Araújo de Souza
Alex Araújo de Souza
Técnico Responsável

Prof. Luiz Pedro de Araújo
Prof. Luiz Pedro de Araújo
Chefe do Laboratório de Metrologia

Data de emissão do certificado: 08/10/2015 Página 2 de 2

ESTE CERTIFICADO É VÁLIDO EXCLUSIVAMENTE PARA O INSTRUMENTO CALIBRADO NAS CONDIÇÕES ESPECIFICADAS, NÃO SENDO EXTENSIVO A QUAISQUER LOTES, MESMO QUE SIMILARES. SUA REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DEPENDERÁ DA AUTORIZAÇÃO FORMAL DO ÓRGÃO METROLÓGICO EMITENTE.
Av. Sen. Salgado Filho, 3000 - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal/RN - CEP: 59.078-970 - Telefons: (0xx84) 3215-3742 - E-mail: labmetrol@ci.ufrn.br

ANEXO 2- Relatório de Malha gerado pelo CFX

2. Mesh Report**Table 2.** Mesh Information for CFX

Domain	Nodes	Elements	Tetrahedra	Wedges	Pyramids	Hexahedra	Polyhedra
Default Domain	3266	16017	16017	0	0	0	0